

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Útlumové a symetrizační články pro měřicí účely
Attenuation element and balancing unit for measuring
purposes**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student: **David Oláh**
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie
Studijní obor: 2612R059 Mobilní technologie
Téma: **Útlumové a symetrizační články pro měřicí účely**
Attenuation Element and Balancing Unit for Measuring Purposes

Zásady pro vypracování:

Pro měření parametrů elektronických částí telekomunikačních zařízení navrhnete a experimentálně ověříte:
1. Útlumové články s definovanou vstupní a výstupní impedancí, nastavitelným útlumem a pro kmitočty do 2 MHz.
2. Pasivní a aktivní symetrizační články s definovatelnou vstupní a výstupní impedancí a pro kmitočty do 2 MHz.

Seznam doporučené odborné literatury:

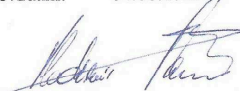
Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Tesar**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry

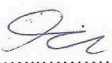



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 20.4.2012



.....
Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňku Tesařovi za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Bakalářské práce je, jak již její název napovídá, rozdělena na dvě části. V první části zabývající se útlumovými články je z počátku probrána problematika útlumu, jeho jednotky, či přepočty. Dále se v této části rozebírá zařazení útlumových článků, jejich rozdělení i základní zapojení. V dalším bodě je popsán návrh, realizace a konečné sestrojení útlumových článků v podobě stavebnice použitelné pro měřicí účely ve výuce na Vysoké škole Báňské. Nakonec první část bakalářské práce zobrazuje a porovnává nasimulované a naměřené výsledky útlumových článků.

Druhá část se poté zabývá články symetrizačními. V počátku popisuje základní myšlenky symetrického vedení signálu, či jeho historii. Dále je tato část rozdělena na dvě poloviny, kdy se první z nich zabývá pasivními symetrizačními články. Popsány jsou základní zapojení, se kterými se můžeme v praxi setkat. Nakonec probíhá návrh symetrizačního transformátoru i s finálním naměřením parametrů. V druhé polovině části, zabývající se symetrizačními články, jsou popsány aktivní zapojení s použitím operačních zesilovačů, či proudových konvektorů. Opět práce zobrazuje několik druhů zapojení a následně popisuje návrh několika z nich i s finálním naměřením vyrobeného symetrizačního článku. Nakonec probíhá porovnání pasivního a aktivního symetrizačního článku.

Klíčová slova

Útlumový článek, útlum, symetrizační článek, pasivní článek, aktivní článek, transformátor, balun, symetrické vedení, operační zesilovač, proudový konvektor

Abstract

Thesis is, as its name suggest, divided into two parts. In the first, which dealing with the attenuators, is from started discussed the issue of attenuation, its units and calculations. Further is in this part discussed inclusion of attenuators, their dividing and the basic connections. At the next point is described the design, realization and final construction of attenuators in the form, which can be used for measuring purposes in teaching at Vysoká škola Báňská. Finally first part of thesis shows and compares simulated and measured results of attenuators.

The second part is dealing with balancing element. In the beginning are described the basic ideas of balanced line, or its history. Further is this part divided into two half, when the first of them is dealing with the passive balancing element. Basic circuits, with which we meet in practise, are described here. Finally is described the design of balanced transformer even with final measuring. In the second half are described the active elements, which uses operational amplifiers or current conveyors. Again this thesis shows several types of connections and then describes designs some of them, even with final measuring of made balancing element. At the end of thesis is compared the passive and the active balancing element.

Key words

Attenuator, attenuation, balancing element, passive element, active element, transformer, balun, balanced line, operational amplifier, current conveyor

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
a	[mm]	Maximální délka vinutí
Au	[-]	Zesílení
β	[-]	Činitel zpětné vazby
B_{STR}	[T]	Střední hodnota sycení jádra
C	[F]	Kapacita
d	[mm]	Maximální průměr vodiče
δ	[mm]	Hloubka vniku
f_{min}	[Hz]	Minimální přenášená frekvence
f_{max}	[Hz]	Maximální přenášená frekvence
k	[-]	Konstanta plnění při navíjení
K	[-]	Poměr napětí
n	[-]	Poměr závitů
n_1	[-]	Počet závitů na 1 cm ²
n_v	[-]	Počet závitů na vrstvu
n_{cm}	[-]	Počet závitů na 1 cm
N_1	[-]	Závitů na primárním vinutí
N_2	[-]	Závitů na sekundárním vinutí
P	[W]	Výkon
R	[Ω]	Odpor
R_Z	[Ω]	Zatěžovací odpor
S	[cm ²]	Průřez jádra
S_0	[cm ²]	Plocha pro vinutí jádra
S_1	[cm ²]	Plocha pro primární vinutí

t	[mm]	Tloušťka prokladů
T	[-]	Počet vrstev
T_p	[-]	Počet prokladů
U	[V]	Napětí
U_{ef}	[V]	Efektivní hodnota napětí
v	[mm]	Výška vinutí
V_{OCM}	[V]	Střední hodnota signálů
V_{ON}	[V]	Invertovaný výstupní signál
V_{OP}	[V]	Neinvertovaný výstupní signál
Z	[Ω]	Impedance
Z_{VST}	[Ω]	Vstupní impedance
Z_{VYST}	[Ω]	Výstupní impedance

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
AD	Analog Devices	
balun	BALanced/Unbalanced	Symetrický/nesymetrický
CC	Current Conveyor	Proudový konvektor
NeSym		Nesymetrický
Sym		Symetrický
OZ		Operační zesilovač

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Útlumové články	2
2.1	Útlum	2
2.2	Typy útlumových článků.....	3
2.3	Návrh útlumových článků	6
2.3.1	Princip návrhu útlumových článků.....	6
2.3.2	Teoretický návrh útlumových článků.....	6
2.3.3	Výpočet útlumových článků.....	8
2.4	Realizace a měření útlumových článků.....	10
2.4.1	Výsledné obvodové zapojení a osazení útlumových článků	10
2.4.2	Simulace útlumových článků z výsledných hodnot	12
2.4.3	Porovnání dosažených výsledků s teoretickými.....	14
3	Symetrizační články	15
3.1	Princip symetrického vedení signálu.....	15
3.2	Pasivní symetrizační článek	16
3.2.1	Balun	16
3.2.2	Další používaná zapojení pasivních symetrizačních článků	17
3.3	Návrh pasivního symetrizačního článku	18
3.3.1	Teoretický návrh pasivního symetrizačního článku	19
3.3.2	Výpočet pasivního symetrizačního článku.....	21
3.3.3	Měření pasivního symetrizačního článku.....	23
3.4	Aktivní symetrizační článek.....	25
3.4.1	Symetrizační článek s dvakrát otáčenou fází	25
3.4.2	Symetrizační článek s jedenkrát otáčenou fází.....	26
3.4.3	Symetrický výstup vytvořený z existujícího nesymetrického	26
3.4.4	Symetrizační článek se zpětným křížením	27
3.4.5	Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory.....	28

3.4.6	Symetrizační článek v podobě integrované obvodu	29
3.5	Návrh aktivního symetrizačního článku za použití klasických OZ.....	31
3.5.1	Symetrizační článek se zpětným křížením	31
3.5.2	Symetrizační článek s jedenkrát otočenou fází	32
3.5.3	Článek pro převod symetrického signálu na nesymetrický	34
3.6	Návrh aktivního symetrizačního článku za použití CC-II ⁺	36
3.7	Měření finálního symetrizačního článku.....	36
3.7.1	Měření symetrizačního článku s jedenkrát otáčenou fází.....	36
3.7.2	Měření článku pro převod symetrického signálu na nesymetrický	37
3.8	Porovnání pasivního a aktivního symetrizačního článku	38
3.8.1	Teoretické porovnání.....	38
3.8.2	Praktické porovnání.....	39
4	Závěr	40
	Použitá literatura	42
	Seznam obrázků	44
	Seznam tabulek	46
	Seznam příloh	i

1 Úvod

O útlumových, či symetrizačních článcích můžeme najít zmínky v mnohých odvětvích elektrotechniky - od Audio, či TV zařízení až po právě naše články určené pro měřicí účely. V každém z těchto odvětví představují sice principiálně stejnou funkci, vždy ale v jiném provedení, či s úplně jinými parametry.

Cílem bakalářské práce je sestrojení těchto útlumových a symetrizačních článků tak, aby mohly být dále použity pro potřebu výuky v měřicích laboratořích. Z toho důvodu výroba útlumových článků probíhá ve formě vycházející z již vytvořených stavebnic v měřicích místnostech na Vysoké škole Báňské. Stejná forma je zvolena i u symetrizačních článků, které ale bude možné rovnou našroubovat na měřicí přístroj, či generátor pomocí BNC konektoru.

Z výše uvedeného je tedy jasné, že bakalářská práce je rozdělena na 2 části. První z nich se zabývá návrhem útlumových článků, kde se v prvních kapitolách bakalářské práce probírá jejich zařazení, základní poznatky návrhu, jejich realizace i následné přeměření a doladění do finální podoby. Druhá část je poté směřována na návrh symetrizačních článků. Tato část je ještě rozdělena na polovinu z důvodu zařazení pasivního i aktivního článku. Obě poloviny jsou taktéž zaměřeny na teoretickou část (transformátory a různá další pasivní zapojení u pasivních, operační zesilovače a proudové konvejory u aktivních článků), a dále na návrhy, zhotovení, proměření a konečně na následné finální doladění.

2 Útlumové články

Jak už z názvu vyplývá, jedná se o elektronické zařízení, které slouží ke snižování úrovně napětí bez výrazného narušení průběhu. Není to však jediná funkce, kterou může útlumový článek mít. Slouží totiž také k impedančnímu přizpůsobení a oddělení jednotlivých impedancí, či k změnám citlivosti.

2.1 Útlum

Než se bakalářská práce začne zabývat útlumovými články jako takovými, mělo by se něco povědět o útlumu samotném, o jeho rozsazích a jednotkách.

Útlum nám udává poměr vstupní a výstupní veličiny. V podstatě říká, o kolik se nám zmenší vstupní veličina na výstupu. Jedná se tedy o opak zisku (zesílení) a v podstatě je útlum zápornou hodnotou zisku.

Jako **základní jednotku útlumu** (či zisku) uvádí Mezinárodní soustava jednotek SI bezrozměrnou jednotku Bel. Ta byla vytvořena v laboratořích Alexandra Grahama Bella roku 1923 k určování útlumu na telefonním vedení. Jelikož je ale tato jednotka pro praxi příliš vysoká, používá se především **Decibel (dB)**. Jak už napovídá předpona, jedná se o desetinu Belu.

Následující vzorce nám ukazují, jak se dá pomocí vstupní a výstupní veličiny spočítat potřebný útlum právě v decibelech.

Známe-li pouze vstupní a výstupní výkon, používáme vzorec (2.1):

$$Au = 10 \log \frac{P_1}{P_2} [\text{dB}; \text{W}, \text{W}] \quad (2.1)$$

A známe-li vstupní a výstupní napětí, či proud, použijeme vzorec (2.2):

$$Au = 20 \log \frac{U_1}{U_2} [\text{dB}; \text{V}, \text{V}] \quad (2.2)$$

Jelikož přepočítání z dB na původní poměr může být zdlouhavý a dochází lehce k chybě, uvádí se tabulka přepočítaných hodnot (Tabulka 2.1).

Tabulka 2.1 Tabulka přepočítaných hodnot z dB na útlum

dB	útlum (poměr U_1/U_2)	útlum (poměr P_1/P_2)
-1	0,89	0,79
-2	0,79	0,63
-3	0,707	0,5
-6	0,5	0,25
-10	0,316	0,1
-20	0,1	0,01
-40	0,01	0,0001

V ní je možno vidět, že například při 6 dB se vstupní napětí zmenší na výstupu na polovinu a při 20 dB dokonce na jednu desetinu vstupní hodnoty. Oproti tomu, bere-li se v potaz výkon, je při 6 dB útlum již čtvrtinový, a při 20 dB dokonce na setině původní hodnoty.

2.2 Typy útlumových článků

Útlumové články je možné vidět v několika různých zapojeních. V podstatě se jedná o děliče zakončené konstantním a konečným výstupním odporem R_Z . Tyto děliče jsou většinou realizovány jako dvojbrany a z toho vyplývá možnost realizovat vysoké útlumy pomocí kaskádového řazení, či frekvenční nezávislost dělicího poměru do řádově jednotek MHz (velmi důležité pro námi navrhnuté útlumové články pracující do 2 MHz). I díky tomu je možné najít útlumové články s jednoduchým zařazením potenciometru (nedoporučuje se z důvodu měnící se vstupní i výstupní impedance a z toho vyplývajícím rozladění obvodu), složené pouze z rezistorů nebo dokonce jako napětím řízené polovodiče (diody typu PIN) ve vysokofrekvenčním zapojení. Pokud by však bylo potřeba realizovat dálkově, případně programově řízené útlumové články, je vhodné zařadit elektronické spínací prvky, jako jsou například polem řízené tranzistory, či relátka. [1]

Často se používají v zapojeních, kde záleží na vstupní a výstupní impedanci (z tohoto důvodu se nesmí použít obyčejný dělič, který má impedance různé).

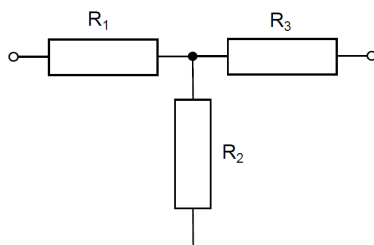
Začneme úplně základním rozdělením a to podle použitých součástek na:

- **pasivní** - složené z rezistorů, potenciometrů
- **aktivní** - složené z PIN diod

Nejčastěji je však možné se setkat s rozdělením článků podle typu zapojení [2]:

- **T-článek**

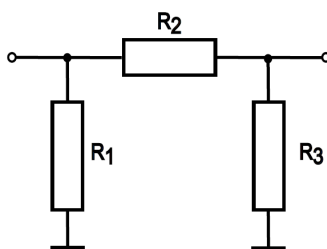
Jedno ze základních zapojení tvarované do písmene T (viz. Obr. 2.1).



Obr. 2.1 T-článek

- **π -článek**

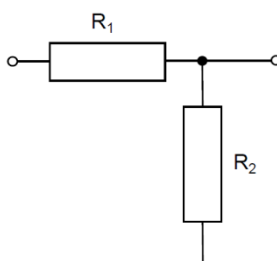
Jedná se o základní, nejvíce používané, zapojení ve tvaru řeckého písmene π (viz. Obr. 2.2).



Obr. 2.2 π -článek

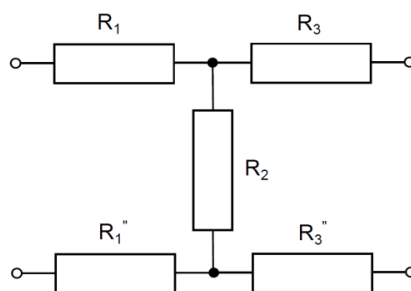
- **Γ -článek**

Γ -článek, někde udáváný také jako L-článek, se nejčastěji využívá v audiotechnice. Tento typ článku je možno vidět na Obr. 2.3.

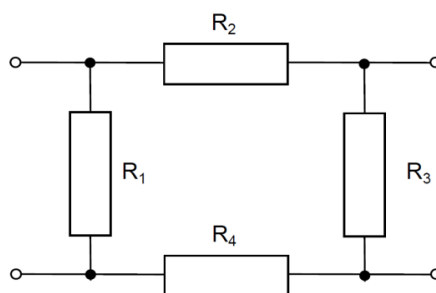


Obr. 2.3 Γ -
článek

Jelikož jsou ale tyto články nevyvážené = všechna napětí v obvodu se vztahují ke společné zemi, existují i jejich symetrické (soustředné) ekvivalenty. U těch naopak platí, že nemají žádný společný zemní vodič a útlum i impedance jsou totožné při pozorování z jedné i druhé strany ($R_1 = R_3$). Tyto soustředné články se opět dělí na článek typu T (udáván také jako H-článek) a článek typu π (udáván dle tvaru jako O-článek). Jak takové články vypadají, je možné vidět na Obr. 2.4 a Obr. 2.5.

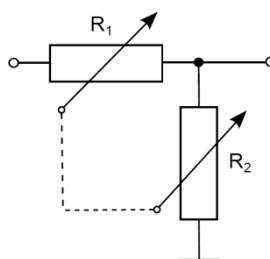


Obr. 2.4 Symetrický T-článek



Obr. 2.5 Symetrický π -článek

Nakonec nám ještě zbývá poslední zapojení a to **nastavitelný Γ -článek**. Ten se používá především v audiotechnice, kdy jsou oba potenciometry vhodným způsobem propojeny pro snadnější ladění. Článek můžeme vidět na Obr. 2.6.



Obr. 2.6
Nastavitelný Γ -
článek

2.3 Návrh útlumových článků

V této části kapitoly bude vysvětlen princip návrhu útlumových článků, včetně výpočtů, výsledných schémat a navržených desek.

2.3.1 Princip návrhu útlumových článků

Z počátku je důležité uvědomit si výslednou podobu útlumových článků. Jelikož se bude jednat o články sloužící pro měřicí účely a především jako výuková pomůcka v předmětech zaměřených na elektrotechniku, rozhodlo se, že každý útlumový článek **bude mít svou vlastní krabičku**. Z toho i vyplývá nutnost návrhu každého článku zvlášť, nezávisle na ostatních. V kapitole 2.3.2, zabývající se návrhem článků je na konci ukázána podoba v kaskádovém řazení, kdy by útlumový článek fungoval přepínatelně v rámci jedné krabičky.

Dále je důležité si uvědomit vstupní a výstupní impedanci útlumových článků. Jelikož se v měřících učebnách nejčastěji vyskytují generátory a osciloskopy ze vstupní/výstupní impedancí **rovné 50 Ω**, budou i naše útlumové články sestaveny tak, aby odpovídali této hodnotě. V kapitole 2.3.2 je navíc ukázán i návrh pro 600 Ω impedanci, což je hodnota klasického telefonního vedení nebo také hodnota používaná v audiotechnice. Dále existují články pro 75 Ω antény, ale ty nejsou předmětem našeho návrhu.

Posledním důležitým rozhodnutím je výběr typu zapojení. Jelikož se nejčastěji používá zapojení **ve tvaru písmene π**, rozhodlo se zařazení i v našem výsledném výpočtu. V průběhu dalších kapitol je však taktéž ukázán výpočet ve formě T-článku a převod mezi těmito, navzájem ekvivalentními zapojeními.

2.3.2 Teoretický návrh útlumových článků

- **π-článek**

Při návrhu se vychází z článku zobrazeném na Obr. 2.2 a z vzorců uvedených v [3].

Pro tento typ článku platí následující vzorce:

$$R_1 = R_3 = Z \left(\frac{K+1}{K-1} \right) [\Omega; \Omega, -] \quad (2.3)$$

$$R_2 = \left(\frac{Z}{2} \right) \left(\frac{K^2-1}{K} \right) [\Omega; \Omega, -] \quad (2.4)$$

, kde Z je požadovaná impedance, R jsou hodnoty odporů a K udává poměr napětí.

Tento poměr se vypočítá podle vzorce (2.5):

$$K = 10^{\frac{A}{20}} [-; \text{dB}] \quad (2.5)$$

, kde A je náš požadovaný útlum.

- **T-článek**

Opět se při návrhu vychází z již zobrazeného zapojení na Obr. 2.1 a z návrhu uvedeném na [3].

Vzorce (2.6) a (2.7) jsou velmi podobné těm, které se používají pro výpočet π -článku (dále je ukázáno, že jsou si dokonce ekvivalentní a popíše se jejich přepočet).

$$R_1 = R_3 = Z \left(\frac{K-1}{K+1} \right) [\Omega; \Omega, -] \quad (2.6)$$

$$R_2 = 2Z \left(\frac{K}{K^2-1} \right) [\Omega; \Omega, -] \quad (2.7)$$

, kde Z je opět požadovaná impedance, R jsou hodnoty odporů a K udává poměr napětí. I v případě T-článku se K vypočítá ze vzorce (2.5).

- **Převod π -článku na T-článek**

Je-li potřeba převést π -článek na jeho ekvivalentní verzi s T-článkem, dají se použít vzorce (2.8) a (2.9), v nichž se v podstatě jedná o transfiguraci trojúhelník - hvězda. U každého vzorce je v indexu uvedeno, zdali se jedná o hodnotu článku π , či T. Vzorce jsou opět uvedené v [3].

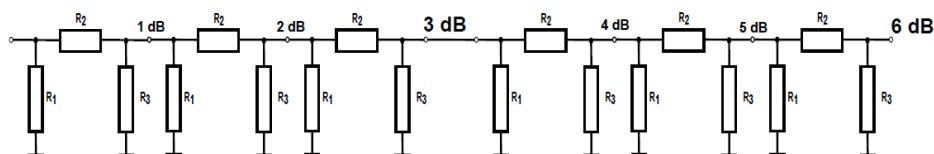
$$R_{2T} = \frac{R_{1\pi} R_{3\pi}}{R_{1\pi} + R_{2\pi} + R_{3\pi}} [\Omega; \Omega] \quad (2.8)$$

$$R_{1T} = R_{3T} = \frac{R_{2T} R_{2\pi}}{R_{1\pi}} [\Omega; \Omega, -] \quad (2.9)$$

- **Kaskádově řazené útlumové články**

Pokud by bylo rozhodnuto pro výrobu v kaskádním řazení, použilo by se více útlumových článků, nejideálněji hodnoty 1 dB. Opět by se zde pracovalo se vzorci (2.3) a (2.4). Návrh výsledné podoby zobrazuje Obr. 2.7.

Při tomto zapojení by však bylo použito příliš mnoho rezistorů, proto se touto variantou bakalářská práce dále nezabývá.



Obr. 2.7 Kaskádově řazený útlumový článek

2.3.3 Výpočet útlumových článků

1. π -článek s požadovanou impedancí rovnou 50Ω a útlumem 3 dB

Na začátku je potřeba zjistit poměrové číslo K . Proto se dosadí do vzorce (2.5):

$$K = 10^{\frac{3}{20}} = 1,4125$$

Dosadí-li se toto poměrové číslo K do vzorců (2.3) a (2.4), je možno zjistit hodnoty všech odporů.

$$R_1 = R_3 = 50 \left(\frac{1,4125 + 1}{1,4125 - 1} \right) = \underline{292,42 \Omega}$$

$$R_2 = \left(\frac{50}{2} \right) \left(\frac{1,4125^2 - 1}{1,4125} \right) = \underline{17,613 \Omega}$$

V kapitole 2.3.4 jsou vždy zobrazeny reálné hodnoty v řádu E24. Následující výpočty jsou již pouze informativní.

2. π -článek s požadovanou impedancí rovnou 50Ω a útlumem 6 dB

$$K = 10^{\frac{6}{20}} = 1,9953$$

$$R_1 = R_3 = 50 \left(\frac{1,9953 + 1}{1,9953 - 1} \right) = \underline{150,47 \Omega}$$

$$R_2 = \left(\frac{50}{2} \right) \left(\frac{1,9953^2 - 1}{1,9953} \right) = \underline{37,353 \Omega}$$

3. π -článek s požadovanou impedancí rovnou 50Ω a útlumem 10 dB

$$K = 10^{\frac{10}{20}} = 3,1623$$

$$R_1 = R_3 = 50 \left(\frac{3,1623 + 1}{3,1623 - 1} \right) = \underline{96 \, \Omega}$$

$$R_2 = \left(\frac{50}{2} \right) \left(\frac{3,1623^2 - 1}{3,1623} \right) = \underline{71,15 \, \Omega}$$

4. π -článek s požadovanou impedancí rovnou 50 Ω a útlumem 20 dB

$$K = 10^{\frac{20}{20}} = 10$$

$$R_1 = R_3 = 50 \left(\frac{10 + 1}{10 - 1} \right) = \underline{61,111 \, \Omega}$$

$$R_2 = \left(\frac{50}{2} \right) \left(\frac{10^2 - 1}{10} \right) = \underline{247,5 \, \Omega}$$

5. π -článek s požadovanou impedancí rovnou 600 Ω

V Tabulce 2.2 jsou zobrazeny hodnoty rezistorů při požadované 600 Ω impedanci již bez výpočtů.

Tabulka 2.2 Hodnoty odporů při impedanci 600 Ω

Požadovaný útlum [dB]	R_1, R_3 [Ω]	R_2 [Ω]
3	3508,83	211,38
6	1805,71	448,22
10	1154,97	853,82
20	733,33	2970

6. T-článek požadovanou impedancí rovnou 50 Ω

Následující tabulka (Tabulka 2.3) ukazuje hodnoty odporů pro článek typu T, při impedanci rovné 50 Ω .

Tabulka 2.3 Hodnoty odporů T-článku při impedanci 50 Ω

Požadovaný útlum [dB]	R_1, R_3 [Ω]	R_2 [Ω]
3	8,5	141,9
6	16,6	66,9
10	25,97	35,14
20	40,91	10,1

2.4 Realizace a měření útlumových článků

2.4.1 Výsledné obvodové zapojení a osazení útlumových článků

Tabulka 2.4 Tabulka reálných hodnot v řádu E24

Požadovaný útlum [dB]	R_1, R_3 [Ω]	R_2 [Ω]	Předpokládaný útlum [dB]
3	300	18	3,05
6	150	39	6,19
10	100	68	9,66
20	62	240	19,71

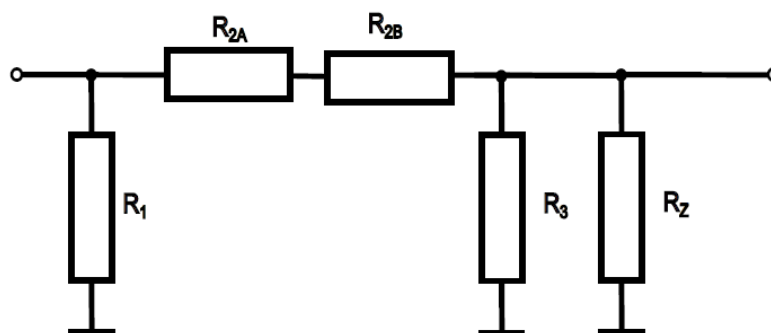
Při přeměrování útlumových článků sestavených podle hodnot v Tabulce 2.4, byly naměřené útlumy ve výši předem předpokládané. Z důvodu co nejvyšší přesnosti (která je samozřejmě požadována) se však hodnoty odporu R_2 musely změnit tak, aby bylo dosaženo zcela přesných útlumů.

V následující Tabulce 2.5 jsou vypsány výsledné hodnoty těchto odporů. Jelikož jejich pořízení v řádu E24 není možné, použije se sériové zapojení více odporů. Tím jsou dosaženy potřebné výsledné hodnoty, jež taktéž můžeme vidět v Tabulce 2.5.

Tabulka 2.5 Tabulka výsledných použitých hodnot

Požadovaný útlum [dB]	R_1, R_3 [Ω]	R_2 [Ω]	R_2 [Ω] v řádu E24
3	300	17	16 Ω + 1 Ω
6	150	37	36 Ω + 1 Ω
10	100	72	62 Ω + 10 Ω
20	62	260	240 Ω + 20 Ω

Výsledné obvodové zapojení zobrazuje Obr. 2.8. Oproti teoretickému, které je možno vidět na Obr. 2.2, přibyl sériově zapojený odpor označený R_{2b} , jenž slouží k doladění výsledného útlumu, a především odpor R_Z , zaručující impedanční přizpůsobení. Jelikož námi používaný osciloskop má vstupní impedanci rovnou přibližně 1 M Ω , v paralelním zapojení s odporem R_Z přivedeným na vstup osciloskopu bude výsledná hodnota impedance velmi ovlivněna tímto odporem a zajistí tak na výstupu útlumového článku přibližně stejnou impedanci, jaká je na vstupu - 50 Ω . Pokud by totiž nebyla na vstupu i výstupu stejná impedance, nepracovaly by útlumové články správně. Navíc pokud by bylo potřeba zařadit články kaskádově, je potřeba aby vstupní a výstupní impedanci byly rovny.



Obr. 2.8 Výsledné obvodové zapojení útlumových článků

Při návrhu desky plošných spojů pro naše vyrobené útlumové články se muselo postupovat podle jednoduchého pravidla. Tím bylo navrhnutí obvodu tak, aby odpory mezi sebou měly pouze malé odstupy a vlastně i velmi krátké a přímé vodiče. Díky tomu mohou články pracovat i ve vyšších frekvencích, aniž by působily jako indukčnost.

Články byly vyrobeny na cuprexitových deskách pro každý požadovaný útlum zvlášť. Na tyto cuprexitové desky byla nanесena deska plošných spojů pomocí fotocesty. Následně byly napájeny odpory podle osazovacího plánu. Desku plošných spojů i osazovací plán lze nalézt v přílohách (Příloha A a Příloha B). V této podobě byly poté vloženy do již předem vyrobené krabičky a tím výroba útlumových článků skončila. Výsledná podoba útlumových článků je vidět na Obr. 2.9.

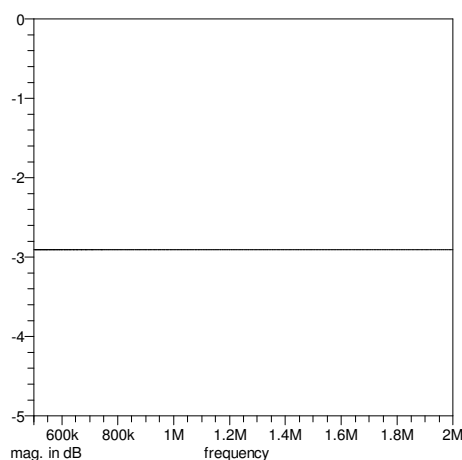


Obr. 2.9 Výsledná podoba útlumového článku

2.4.2 Simulace útlumových článků z výsledných hodnot

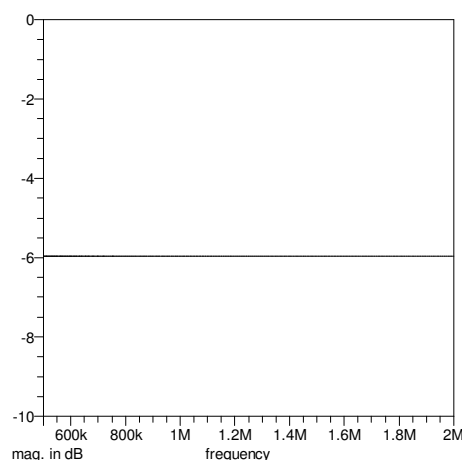
Pro simulaci výstupů útlumových byl vybrán program Snap, sloužící k analýze elektronických obvodů. Výstupem tohoto programu jsou následující obrázky.

Na Obr. 2.10 lze vidět, že výsledná nasimulovaná hodnota dosahovala asi 2,9 dB. Přesných 3 dB však při žádné hodnotě odporů nebylo možno dosáhnout. Proto zůstaneme na výsledných hodnotách z Tabulky 2.5 a v následující kapitole 2.4.3 se provede porovnání s prakticky naměřenými hodnotami.



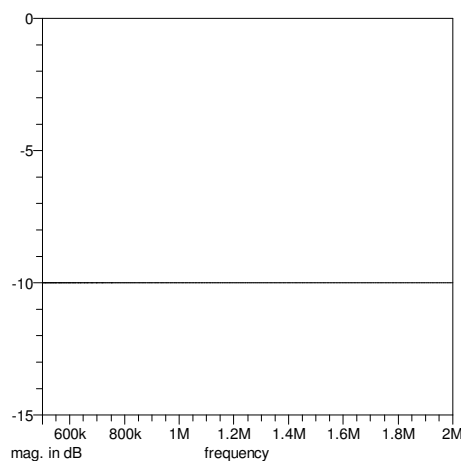
*Obr. 2.10 Nasimulovaná hodnota
-3 dB útlumového článku*

Stejného výsledku bylo dosaženo i při simulování -6 dB útlumového článku (viz. Obr. 2.11). Tentokrát byla hodnota téměř rovna -6dB a při žádné nominální změně odporů nedosáhla lepších výsledků.



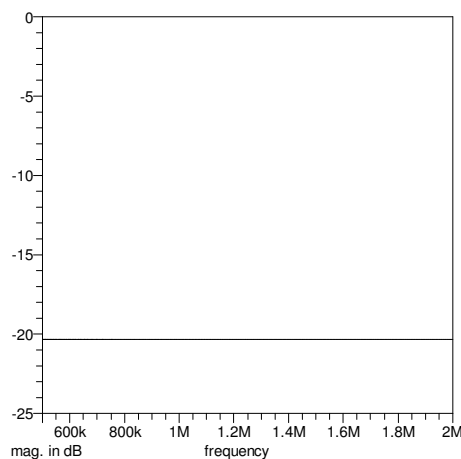
*Obr. 2.11 Nasimulovaná hodnota -
6 dB útlumového článku*

Na Obr. 2.12 je vidět simulace pro útlumový článek -10 dB. U tohoto článku se podařilo dosáhnout přesné hodnoty útlumu, neměly by se tedy při následné realizaci objevovat žádné komplikace.



*Obr. 2.12 Nasimulovaná hodnota
-10 dB útlumového článku*

Posledním nasimulovaným článkem je útlumový článek -20 dB, který je možné vidět na Obr. 2.13. U tohoto zapojení byl výsledný útlum asi -20,5 dB a ani zde se nepovedlo dosáhnout lepších výsledků při jakékoliv změně hodnot odporů.



*Obr. 2.13 Nasimulovaná hodnota
-20 dB útlumového článku*

Jak je na všech nasimulovaných charakteristikách vidět, hodnoty útlumu se při změně frekvence nijak nemění a dosahují tak stejných hodnot i při pro nás potřebných 2 MHz. Dosáhne-li se takových výsledků i v reálu je ukázáno v kapitole 2.4.3.

2.4.3 Porovnání dosažených výsledků s teoretickými

Dosažené výsledky hotových útlumových článků zobrazuje Tabulka 2.6. Z ní je patrné, že při hodnotách 6, 10 a 20 dB se dosáhlo téměř ideálních hodnot, rovnajících se s nasimulovanými v programu Snap. Pouze v případě 3dB útlumového článku je jeho reálná hodnota o asi 5 % nižší. Tento rozdíl je nejspíše zapříčiněn použitím neúplně přesných hodnot rezistorů.

Tabulka 2.6 Porovnání dosažených a teoretických výsledků

Požadovaný útlum [dB]	Nasimulovaná hodnota [dB]	Reálná hodnota [dB]
3	2,9	2,74
6	6	6
10	10	10,09
20	20,1	20,1

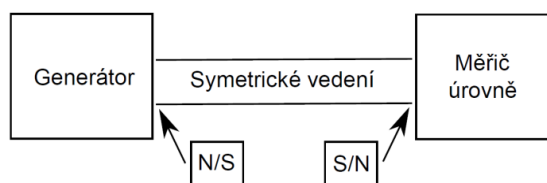
Výsledné průběhy z osciloskopu je možno najít v příloze (Příloha C).

3 Symetrizační články

3.1 Princip symetrického vedení signálu

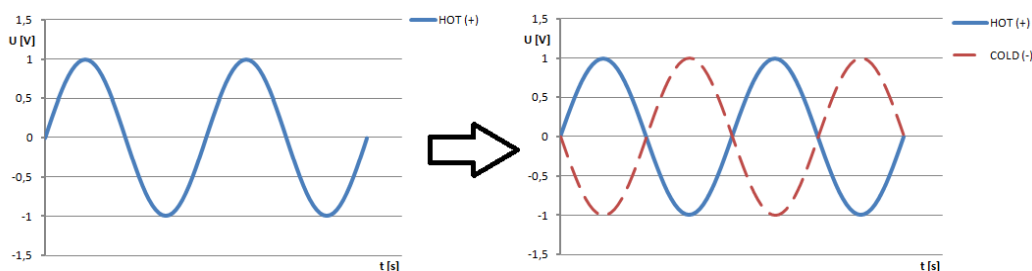
Na počátku této kapitoly, pojednávající o symetrizačních článcích, jejich návrhu a zhotovení, je potřeba si něco povědět o principu vedení symetrického signálu, či o jeho vytvoření.

Symetrické vedení je používáno v mnoha odvětvích elektrotechniky - v Audio zařízeních, pro propojení přijímače/vysílače s anténou nebo v telekomunikační technice. V našem případě se bude jednat o články sloužící pro měřicí účely, kdy se například generátor s nesymetrickým výstupem a měřič úrovně s nesymetrickým vstupem budeme snažit propojit mezi sebou symetrickým vedením (viz. Obr. 3.1). Hlavním důvodem, proč používat symetrické vedení, je lepší ochrana procházejícího signálu před okolním rušením a šumem.



Obr. 3.1 Obecné schéma symetrického vedení

Symetrie takového vedení spočívá ve vedení signálu třížilovým kabelem. To znamená, že oproti nesymetrickému vedení, které má dvě žíly - signálový vodič a stínění (zem), má symetrické zapojení žíly tři, a to v poměru dvou signálových vodičů a stínění. Tyto dva signálové vodiče se značí jako Hot (+) a Cold (-). Matematicky se poté dá numerická hodnota signálu Cold vyjádřit jako hodnota signálu Hot vynásobená mínus jedna, či jako signál otočený o $180^\circ \Rightarrow$ jedná se přesně o opačný signál. Výsledný signál se tedy skládá z původního signálu Hot, opačného signálu Cold a stínění propojeného se zemí. Jak takový signál vypadá, je vidět na Obr. 3.2 (nalevo signál nesymetrický, vpravo signál symetrický).



Obr. 3.2 Princip symetrického vedení

Pokud na symetrický kabel bude působit rušení, bude současně stejně působit na signálový vodič Hot i na signálový vodič Cold. To znamená, že se toto rušení objeví mezi oběma vodiči a zemí. Oproti nesymetrickému vedení, kde přichází rušení působí na signálový vodič i na stínění se stejnou polaritou (z čehož vyplývá, že jediná ochrana oproti rušení je v kvalitním stínění), u symetrického působí na oba signálové vodiče tak, že na vodič Cold je přiveden s polaritou opačnou. Z toho tedy vyplývá i otočení polarity rušivého signálu a při propojení se zemí i k jeho odečtení. Více o symetrických kabelech a vedeních je možné najít v [4] (především o audio zapojení) a [5].

Poprvé bylo symetrické vedení použito v telefonní lince. Rušení, které předtím mělo malý význam v telegrafii, bylo velmi nežádoucí pro telefonní uživatele. Původně se vzali dvě nesymetrická vedení a použili se v párovém zapojení. Toto řešení se ale ukázalo jako nedostatečné. Telefonní linka se totiž vedla po stejné trase jako elektrické vedení a jelikož jedno z nesymetrických vedení bylo tomu elektrickému blíže, po několika kilometrech docházelo k velkým rozdílům působení rušení na telefonní vedení. Řešením tedy bylo po několika kilometrech vyměnit pozice nesymetrických vedení, čímž docházelo ve výsledku ke stejnému působení rušení na obě vedení. S růstem telefonie začalo být požadováno použití specifických kabelů namísto venkovního vedení (především z důvodu ochrany před špatným počasím). Z toho důvodu byl vytvořen pro symetrické vedení kabel, který používáme dodnes - kroucená dvojlinka. Velkého rozšíření se dočkala ale až s příchodem opakovačů, do té doby dokázala přenést signál na vzdálenost pouhých 30 km (oproti venkovnímu vedení, které dokázalo přenést signál na obrovské vzdálenosti - nejdelší bylo mezi Chicagem a New Yorkem o délce 1500 km). [6]

Dnes se běžně setkáváme se symetrickým vedením v podobě dvouvodičového vedení (používané pro přenos rádiových vln), či právě v podobě kroucené dvojlinky.

3.2 Pasivní symetrizační článek

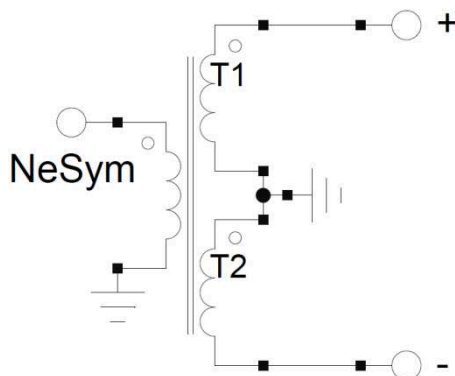
Pasivní symetrizační článek se i přes svou obtížnější realizaci používá v mnoha odvětvích dodnes. Mohou se vyskytovat v audio technice, či při připojování nesymetrického vstupu a výstupu antény nebo zařízení se symetrickým vedením. Porovnáním s aktivním článkem se zabývá pozdější kapitola 3.8.

3.2.1 Balun

V technické literatuře je při návrhu symetrizačního transformátoru možné se často setkat s pojmem **Balun**. Toto označení vychází z anglických slov **Balanced** a **Unbalanced**,

což v překladu do češtiny znamená Symetrický/Nesymetrický. Jedná se tedy o převodník symetrického signálu na jeho nesymetrický ekvivalent a naopak, či funguje jako článek k přizpůsobení impedance výstupu/vstupu a přenosového média.

Aby transformátor pracoval jako balun, je potřeba jej zapojit podle Obr. 3.3. Zde je sekundární vinutí ve svém středu uzemněno, díky čemuž se objevuje možnost odebrat na výstupu kladné i záporné, čili symetrické, napětí.

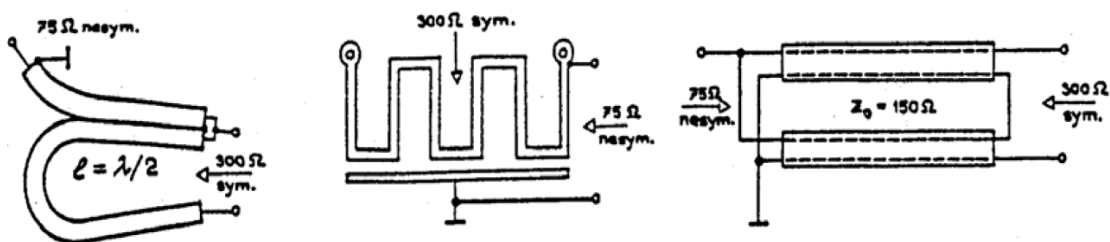


Obr. 3.3 Symetrizační transformátor

Hlavním parametrem balunů je jejich impedanční poměr. Tento poměr udává, kolikrát se změni hodnota impedance ze vstupu transformátoru na jeho výstupu. V praxi je možné se setkat s baluny různých poměrů. Jedním z nich je například balun 1:1. To znamená, že impedance, která je naměřená na vstupu transformátoru, bude rovna i impedanci, naměřené na jeho výstupu. Dalším balunem je například balun 4:1, který se například používá pro připojení antény s impedancí 300 Ω ke koaxiálnímu kabelu, který má impedanci 75 Ω .

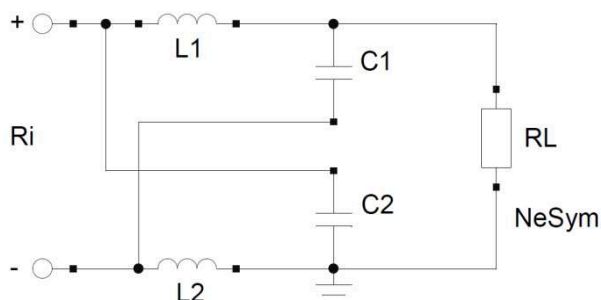
3.2.2 Další používaná zapojení pasivních symetrizačních článků

Mezi další používaná zapojení patří především různá řešení s pomocí vedení. Tyto symetrizační články jsou používány spíše ve vysokofrekvenčních zapojeních, především pro propojení anténových vysílačů/přijímačů. Slouží také k impedančnímu přizpůsobení. Následující zapojení jsou převzaty z [8] a lze je vidět na Obr. 3.4 (z leva doprava se jedná o úzkopásmový symetrizační článek s půlvlnným vedením; symetrizační článek s půlvlnným vedením na plošném spoji; symetrizační článek ze dvou čtyřvlnných vedení 150 Ω)



Obr. 3.4 Různá provedení symetrizačních článků pomocí vedení

Posledním článkem, který ještě nebyl zmíněn, je symetrizační článek typu L-C, jenž převádí symetrický signál na nesymetrický. Je složen ze dvou kondenzátorů a dvou cívek, které každá otáčí fází o $\pm 90^\circ$. Jak takový článek vypadá, zobrazuje Obr. 3.5 a vzorce pro výpočet jsou (3.1), (3.2) a (3.3).



Obr. 3.5 Symetrizační článek typu L-C

$$Z = \sqrt{R_i \cdot R_L} \text{ } [\Omega; \Omega, \Omega] \quad (3.1)$$

$$L_1 = L_2 = \frac{Z}{2 \cdot \pi \cdot f} \text{ } [\text{H}; \Omega, \text{Hz}] \quad (3.2)$$

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z} \text{ } [\text{F}; \text{Hz}, \Omega] \quad (3.3)$$

3.3 Návrh pasivního symetrizačního článku

Při návrhu symetrizačních článků tvořeným ve formě transformátorového balunu je potřeba postupovat podle několika základních kroků. Tyto kroky jsou velmi podobné těm, které jsou při návrhu výstupních transformátorů uvedeny v [9].

Hlavním úkolem balunu bude v tomto případě transformovat vstupní impedanci na výstupní v poměru 1:1 a navíc symetrizovat signál. Vstupní napětí bude rovno $U_{ef} = 0,775 \text{ V}$

a impedance $Z_{VST} = Z_{VYST} = 600 \, \Omega$. Navíc bude článek pracovat v hovorovém pásmu, tedy ve frekvenčním rozmezí 300 - 3400 Hz. Zbylé hodnoty je potřeba si dopočítat.

3.3.1 Teoretický návrh pasivního symetrizačního článku

1. Výpočet poměru závitů

Je-li známa vstupní impedance Z_{VST} a stejně tak Z_{VYST} , existuje možnost spočítat poměr závitů.

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_1}{Z_2} [-; \Omega, \Omega] \quad (3.4)$$

Z toho vyplývá i vzorec pro výpočet vstupní impedance, známe-li výstupní a naopak.

$$Z_{VST} = n^2 \cdot Z_{VYST} [\Omega; \Omega] \quad (3.5)$$

$$Z_{VYST} = \frac{1}{n^2} \cdot Z_{VST} [\Omega; \Omega] \quad (3.6)$$

2. Výpočet výkonu

Pro další výpočty je potřeba vypočítat výkon transformátoru na primárním vinutí (v tomto případě v podstatě i na sekundárním). K výpočtu je potřeba znát pouze vstupní impedanci a efektivní hodnotu napětí.

$$P = \frac{U_{ef}^2}{Z_{VST}} [W; V, \Omega] \quad (3.7)$$

3. Velikost jádra

V tomto kroku si zvolíme velikost jádra. Pokud by však jádro nakonec pro náš transformátor nebylo dostatečné, provedeme korekci a velikost zvýšíme.

$$S = 20 \cdot \sqrt{\frac{P}{f_{min}}} [\text{cm}^2, W, \text{Hz}] \quad (3.8)$$

, kde S je průřez jádra, P je výkon a f_{min} je dolní přenášená frekvence.

4. Výpočet počtu závitů

Počet závitů se vypočítá podle vzorce (3.9), kdy je snahou dosáhnout co nejrozsáhlejších hodnot.

$$N_1 = \frac{U_{ef} \cdot 10^4}{\frac{2\pi}{2} f_{min} \cdot B_{STR} \cdot S} \text{ [počet závitů; Hz, T, cm}^2\text{]} \quad (3.9)$$

, kde B_{STR} je střední hodnota sycení jádra (v našem případě rovna 0,7 T).

Jelikož je počet závitů na vstupu roven i počtu závitů na výstupu, platí vztah $N_1 = N_2$ a není tedy nutné počítat jejich počet na sekundárním vinutí.

5. Maximální velikost vodiče

Pomocí nejvyšší frekvence můžeme vypočítat tzv. hloubku vniku.

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f_{max}}} \text{ [mm; Hz]} \quad (3.10)$$

získáme maximální hloubku vniku, která musí být minimálně 2x vyšší než je průměr vodiče.

6. Průměr vodiče

Pro výpočet vodiče je prvně potřeba si zjistit plochu pro vinutí vybraného jádra. Jelikož transformátor obsahuje vinutí dvě, vydělí se tato hodnota dvěma.

$$S_1 = \frac{S_0}{2} \text{ [cm}^2\text{; cm}^2\text{]} \quad (3.11)$$

Z této plochy je potřeba dále vypočítat počet závitů na 1 cm² plochy.

$$n_1 = \frac{N_1}{S_1} \text{ [-; -, cm}^2\text{]} \quad (3.12)$$

Nakonec je potřeba si podle n_1 najít průměr vodiče, který zároveň nesmí být větší než dvojnásobek δ .

7. Kontrola proveditelnosti

Kontrola proveditelnosti udává, zdali se vybrané vinutí vleze do vybraného jádra i s proklady mezi vinutími.

Ke zjištění proveditelnosti je prvně potřeba vypočítat množství závitů na vrstvu.

$$n_v = n_{cm} \cdot a \cdot 0,1 \text{ [-; -, mm]} \quad (3.13)$$

, kde n_v je množství závitů na vrstvu, n_{cm} počet závitů pro určitý průměr vodiče na 1 cm délky a a je největší možná délka pro vinutí.

Dále je potřeba zjistit počet vrstev.

$$T = \frac{N_1}{n_v} [-; -] \quad (3.14)$$

, kde T se zaokrouhluje na nejbližší vyšší číslo.

Výška vinutí se poté vypočítá podle vzorce (3.15).

$$v = T \cdot d \cdot k + T_p \cdot t \text{ [mm; -, mm, -, -, mm]} \quad (3.15)$$

, kde v je výška vinutí, d je maximální průměr vodiče, k je konstanta plnění při navíjení (závisí na průměru vodiče - do průměru 0,4 mm je $k = 1,05$ a pro 0,4 - 0,8 mm je rovno 1,1), T_p je počet prokladů a t je jejich tloušťka.

3.3.2 Výpočet pasivního symetrizačního článku

Výpočet pasivního symetrizačního článku probíhá podle, v minulé části bakalářské práce uvedených, bodů. V této části se používají k finálnímu výpočtu.

1. Výpočet poměru závitů

Jelikož je známa vstupní i výstupní impedance, dosadí se obě do vzorce (3.4) a zjistí se poměr vstupních a výstupních závitů.

$$n = \frac{N_1}{N_2} = \frac{600}{600} = 1$$

Jelikož nám vyšel poměr roven jedné, bude počet primárních závitů roven počtu sekundárních.

2. Výpočet výkonu

Dosadí-li se do vzorce (3.7), je možno zjistit velikost výkonu (jelikož je $n = 1$, je v ideálním případě výkon na primárním vinutí roven výkonu na sekundárním).

$$P = \frac{0,775^2}{600} = 1 \text{ mW}$$

3. Velikost jádra

Pro zjištění velikosti jádra je potřeba dosadit do vzorce (3.8).

$$S = 20 \cdot \sqrt{\frac{0,001}{300}} = 0,037 \text{ cm}^2$$

Nejbližším jádrem v tomto případě je jádro složené z plechu typu M5. V tomto případě je průřez jádra roven $0,2 \text{ cm}^2$.

4. Výpočet počtu závitů

Dosazením do vzorce (3.9) se zjistí počet primárních závitů (jak již bylo uvedeno, tento počet platí i pro sekundární vinutí).

$$N_1 = \frac{0,775 \cdot 10^4}{\frac{2 \cdot \pi}{2} \cdot 300 \cdot 0,7 \cdot 0,2} = 41,56 \Rightarrow 42 \text{ závitů}$$

5. Maximální velikost vodiče

Nežli je možno vypočítat velikost vodiče, je potřeba zjistit jeho maximální povolenou velikost podle vzorce (3.10).

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{3400}} = 1,29 \text{ mm}$$

Velikost vodiče tedy musí být maximálně $2,58 \text{ mm}$.

6. Průměr vodiče

Pro výpočet průměru vodiče je nutné si zjistit plochu pro vinutí námi vybraného jádra, jež je v tomto případě $0,3 \text{ cm}^2$. Dosadí-li se tato hodnota do vzorce (3.11), je možno získat velikost plochy pro každé vinutí zvlášť.

$$S_1 = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ cm}^2$$

Z této plochy je potřeba dále vypočítat dle vzorce (3.12) počet závitů na 1 cm^2 plochy.

$$n_1 = \frac{42}{0,15} = 280$$

Bere-li se v potaz zahrnutí prokládání mezi vinutí, je potřeba vybrat průměr vodiče tak, aby se vlezl do našeho jádra. V tomto případě je vybrán průměr o velikosti **0,4 mm**, jenž nám dovoluje téměř dvojnásobný počet závitů na cm^2 (přesněji se rovná o hodnotu 450 závitů na cm^2). Tato hodnota je i navíc nižší než dvojnásobek δ .

7. Kontrola proveditelnosti

Zprv je potřeba vypočítat množství závitů na vrstvu podle vzorce (3.13).

$$n_v = n_{cm} \cdot a \cdot 0,1 = 21 \cdot 12 \cdot 0,1 = 25,2$$

Dále je potřeba zjistit počet vrstev. K tomu slouží vzorec (3.14).

$$T = \frac{42}{25,2} = 1,667 \Rightarrow 2$$

Výška vinutí se poté vypočítá podle vzorce (3.15).

$$v = 2 \cdot 0,445 \cdot 1,05 + T_p \cdot t = 0,935 + T_p \cdot t$$

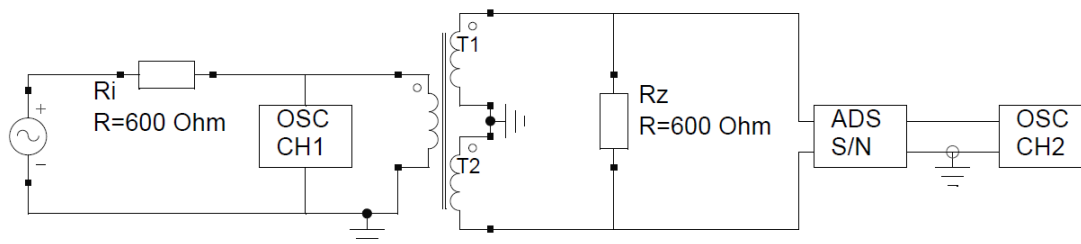
Bere-li se tedy v potaz, že vinutí jsou 2, vychází nám výška vinutí bez prokládání rovna 1,87 mm. Jelikož je její maximální povolená hodnota pro jádro tvořené z plechů M5 rovna 2,5 mm, zbývá dostatečný prostor pro proklady a v tomto provedení je transformátor konstruovatelný.

3.3.3 Měření pasivního symetrizačního článku

Jelikož by výroba pasivního symetrizačního článku byla příliš složitá z důvodu namotávání závitů, vysoké ceny a nedostupnosti některých jader, bylo rozhodnuto, že se přeměří již hotové symetrizační transformátory z laboratoří Vysoké školy Báňské. V tomto případě se přesněji jedná o transformátor firmy Tronic Praha, pracující ve stejném frekvenčním pásmu, jako náš navržený, tedy 300 - 3400 Hz s vstupní a výstupní impedancí rovnou 600 Ω .

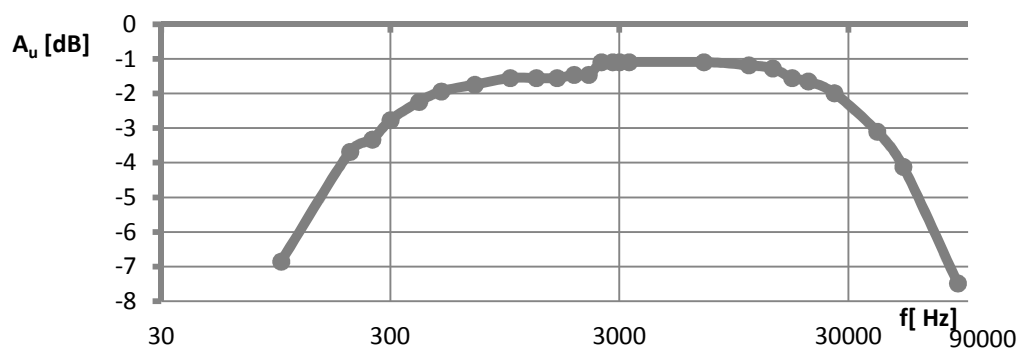
Cílem bylo přeměření tohoto transformátoru a především zjištění, zdali pracuje v požadovaném frekvenčním pásmu tak, jak je předpokládáno. Z toho důvodu bylo potřeba přeměření frekvenční charakteristiky transformátoru. Aby však výsledky měly co nejprůkaznější hodnotu, probíhalo měření na 5 teoreticky totožných transformátorech a naměřené hodnoty byly poté zprůměrovány.

Pro měření byl transformátor zapojen tak, jak jej zobrazuje Obr. 3.6. Vstup generátoru (s impedancí 600 Ω) byl připojen na první kanál osciloskopu. Poté byl tento signál přiveden na symetrizační transformátor, kde byl přes aktivní diferenciální sondu (neboli aktivní symetrizační článek pro převod symetrického signálu na nesymetrický, o němž pojednává nadcházející kapitola) opět vytvořen nesymetrický signál a připojen na druhý kanál osciloskopu.



Obr. 3.6 Zapojení symetrického transformátoru při měření

Výslednou frekvenční charakteristiku zobrazuje Obr. 3.7.



Obr. 3.7 Frekvenční charakteristika symetrického transformátoru

Jak je na charakteristice patrné, pro hovorové frekvenční pásmo pracuje transformátor velmi spolehlivě. Problém má především při nižších hodnotách frekvence, kdy napětí při 300 Hz sice ještě klesá o necelé 3 dB, pod hovorovým pásmem ale poté klesá prudčeji a při 100 Hz dosahuje napětí již méně než poloviny (pokles o téměř 7 dB). Při vyšších frekvencích než 3400 Hz však transformátor pracuje velmi dobře, hodnota napětí klesá o 3 dB až při 40 kHz, méně než poloviny dosahuje dokonce až při frekvenci 90 kHz. Z měření tedy vyplývá použitelnost transformátoru v požadovaném hovorovém pásmu i využití v zapojeních, kdy je potřeba práce ve frekvenčním rozmezí až do 40 kHz.

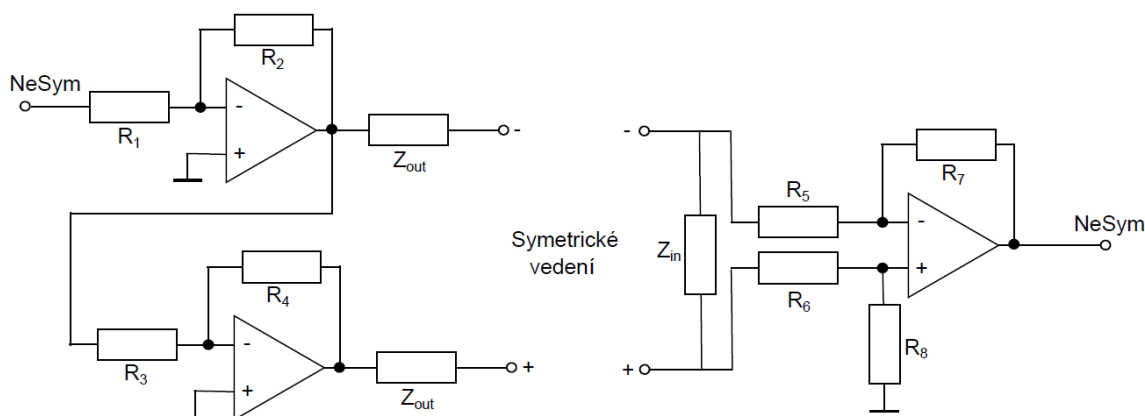
3.4 Aktivní symetrizační článek

Symetrizační článek, beroucí se jako aktivní, bývá složen především z operačních zesilovačů a jejich různých druhů zapojení. V našem případě budou popsány zapojení s použitím klasických operačních zesilovačů a stejně tak symetrizační články s aplikací kladných proudových konvektorů (Current Conveyor 2. generace - CC-II⁺). Nakonec se práce zmiňuje i o symetrizačních člancích v podobě integrovaného obvodu. Základní poznatky a pro náš symetrizační článek důležitá zapojení si popíšeme v následujících kapitolách.

Druhů zapojení aktivních symetrizačních článků je spousta. Ne vždy je ale zapojení vhodné pro konkrétní aplikaci a tak je důležité správně vybrat. Tato část kapitoly ukazuje a následně popisuje několik druhů těchto zapojení.

3.4.1 Symetrizační článek s dvakrát otáčenou fází

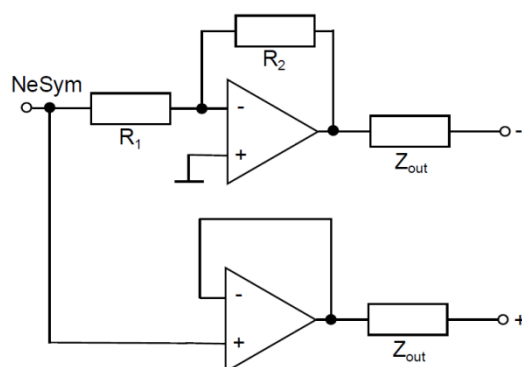
Nejjednodušší typ zapojení je znázorněn na Obr. 3.8. Na něm putuje signál ze vstupního nesymetrického vstupu do invertujícího zapojení operačního zesilovače. Invertovaný signál, vystupující ze zesilovače, je poté přiveden přes oddělovací odpor na jeden ze symetrických výstupů. Tento signál je zároveň přiveden na druhý operační zesilovač, kde je opět invertován a tím v podstatě navrácen do původní hodnoty. Toto řešení se hodí především v momentech, v kterých je potřeba původní signál i zesílit. Signál je totiž zesílen pouze na prvním z operačních zesilovačů a na druhém je už pouze nutné jej zpátky otočit. Toto zapojení je tudíž pro náš výrobek nepříliš vhodné, jelikož potřebujeme vstupní signál ve stejné podobě i na výstupu. Po průchodu signálu přes symetrické vedení jsou následně výstupy přivedeny na rozdílový zesilovač, kde jsou zpátky převedeny do původní podoby. Tím získáváme na výstupu opět nesymetrický signál.



Obr. 3.8 Symetrizační článek s dvakrát otáčenou fází

3.4.2 Symetrizační článek s jedenkrát otáčenou fází

Další typ zapojení je velmi podobný předchozímu, přesto jeho zapojení pracuje na jiném principu. Toto zapojení je znázorněno na Obr. 3.9. Signál je opět přiveden na vstup článku, kde tentokrát prochází v (teoreticky) stejnou dobu operačním zesilovačem v zapojení napěťového sledovače i invertujícím zapojením. Signál je tedy přes napěťový sledovač pouze impedančně oddělen a přiveden na kladnou žílu HOT, a zároveň je fázově otočen a přiveden na zápornou žílu COLD.

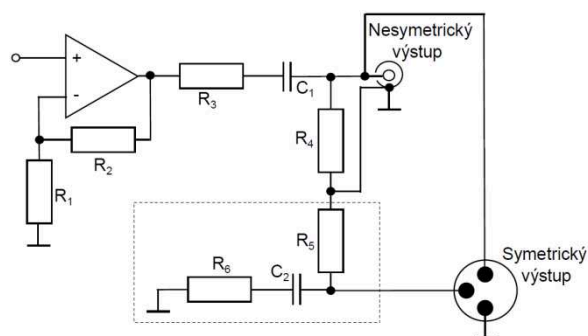


Obr. 3.9 Symetrizační článek s jedenkrát otáčenou fází

S tímto druhem zapojení budeme nadále pracovat při návrhu, kde si ukážeme jeho rozšířenou finální verzi.

3.4.3 Symetrický výstup vytvořený z existujícího nesymetrického

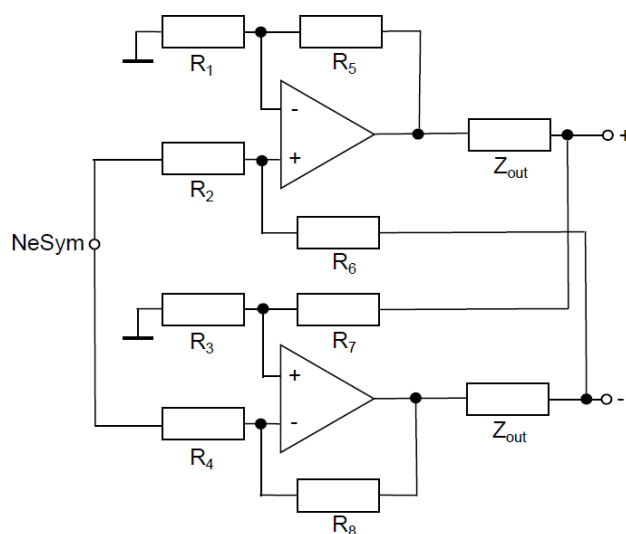
Jednou z dalších možností výroby symetrizačního článku zobrazuje Obr. 3.10. V tomto případě je prvně vytvořen nesymetrický výstup, který je poté na symetrický konektor přiveden jako kladný signál. Pro záporný poté stačí použít impedanční přizpůsobení (na schématu zvýrazněno) a připojit opět na symetrický konektor. Tím docílíme výstupního symetrického signálu. Toto řešení je velmi jednoduché, jak z pohledu zapojení, tak i bere-li se v potaz počet použitých součástek. Jeho funkčnost ale není vždy spolehlivá a tak se jím nebudeme dále zabývat. [10]



Obr. 3.10 Symetrický výstup vytvořený z existujícího nesymetrického

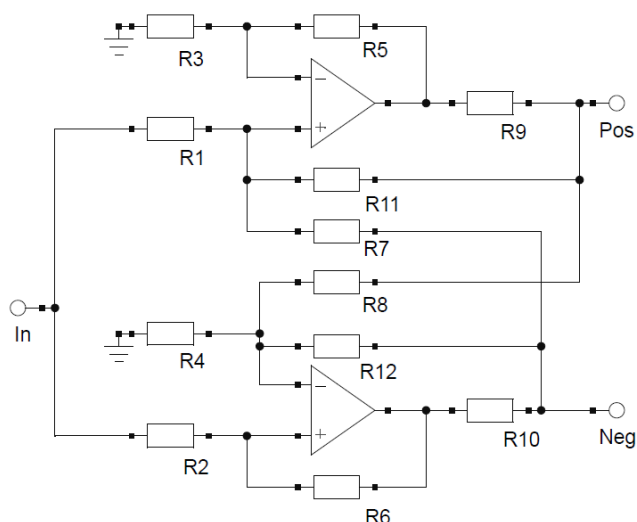
3.4.4 Symetrizační článek se zpětným křížením

Posledním zapojením s operačním zesilovačem, které je zde uvedeno, je zapojení s takzvaným zpětným křížením. Jak je patrné na Obr. 3.11, jedná se opět o klasické zapojení s invertujícím zapojením a napěťovým sledovačem. V této podobě se ale z jejich výstupů signál přivádí zpět na kladný vstup operačních zesilovačů, kde se přičítá/odečítá k procházejícímu signálu. Důvod tohoto řešení je vcelku jednoduchý. Vezme-li se v potaz, že činitel zpětné vazby β je u obou zapojení různý (při sledovači je roven 1, u invertujícího zapojení naopak roven 0,5), jejich mezní frekvence si nemohou být rovny. Tím pádem ani fázové charakteristiky nemusí být souměrné. Jelikož však u symetrizačních článků, především pro naše měřicí účely, je potřeba téměř dokonalé symetrie ne pouze z hlediska otočení signálu, ale i fázového posuvu, používá se právě toto zapojení. V kapitole 3.5.2, pojednávající o návrhu symetrizačního článku s jedenkrát otočenou fází, se s tímto problémem zabýváme také, tentokrát je ale řešením zařazení RC členu.



Obr. 3.11 Symetrizační článek se zpětným křížením

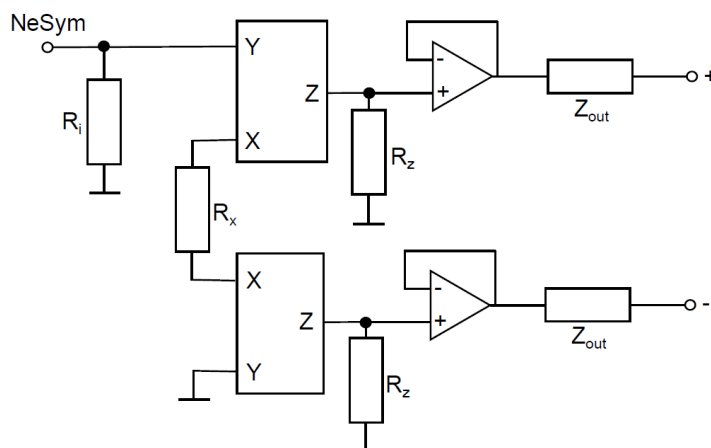
Zapojení na Obr. 3.11 vychází ze schématu uvedeného Thomasem Hayem v roce 1980 [11]. Toto zjednodušené zapojení, jehož základ pochází z hlavy George D. Pontise (jehož originální schéma je zobrazeno na Obr. 3.12 a lze jej najít v [12]), je dnes velmi rozšířené a mnoho integrovaných symetrizačních článků je založeno na tomto zapojení. Právě ním se budeme nejvíce zabývat v kapitole 3.5.1, kde je ukázán jeho návrh i s experimentálním přeměřováním parametrů.



Obr. 3.12 Originální schéma symetrizačního článku se zpětným křížením

3.4.5 Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory

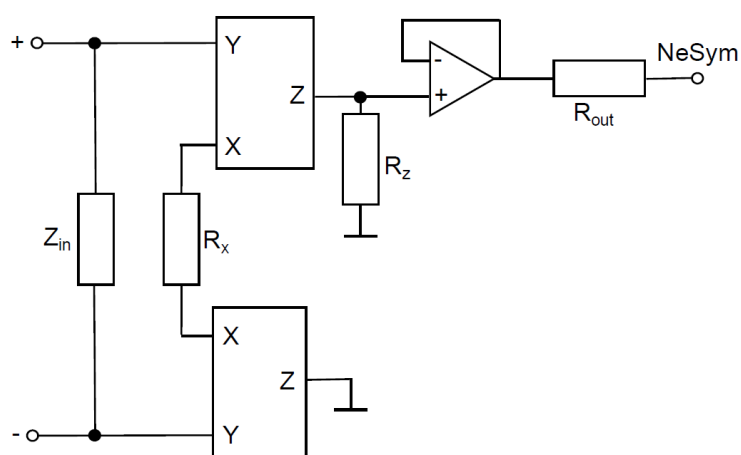
Další možností, jak zhotovit symetrizační článek je použití proudových konvektorů, jehož schéma znázorňuje Obr. 3.13.



Obr. 3.13 Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory (NESYM-SYM)

Zde jsou proudové konvejory zapojeny jako neinvertující a invertující napěťový zesilovač (viz. [14]). Na vstup Y neinvertujícího zesilovače je připojen nesymetrický signál, na druhém konveju je naopak vstup Y uzemněn a tím je docíleno otočení fáze na výstupu Z. Odpory R_X a R_Z poté určují zesílení, čímž se práce zabývá v kapitole 3.6. Na výstupech jsou dále zařazeny napěťové sledovače pro oddělení obvodu od zátěže a odpory pro určení výstupní impedance.

Pro převod symetrického signálu na nesymetrický je použito schéma zobrazené na Obr. 3.14. Zde je v podstatě invertovaný signál potlačen a na výstupu tedy odebíráme zpátky signál nesymetrický. Vstupní odpor opět určuje vstupní impedanci, odpory R_X a R_Z poté hodnotu zesílení.

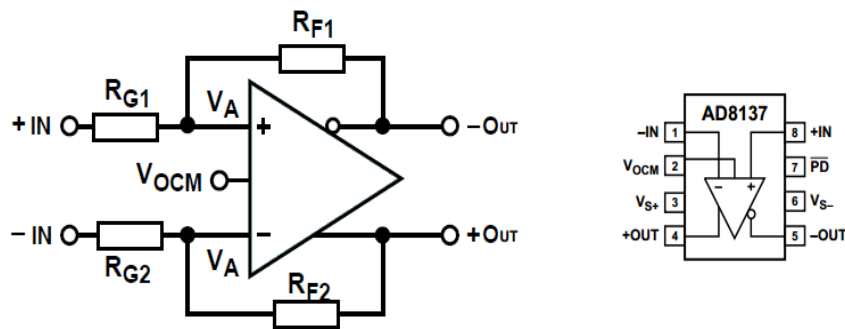


Obr. 3.14 Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory (SYM-NESYM)

Výhodou zapojení s proudovými konvejory je, že při ideálních podmínkách prakticky neexistuje zpětná vazba. Díky tomu jsou tyto obvody velmi stabilní a mohou pracovat v obrovském frekvenčním rozsahu (až do několika set MHz). Více se o proudových konvejech zmiňují v [13], [14] a [15].

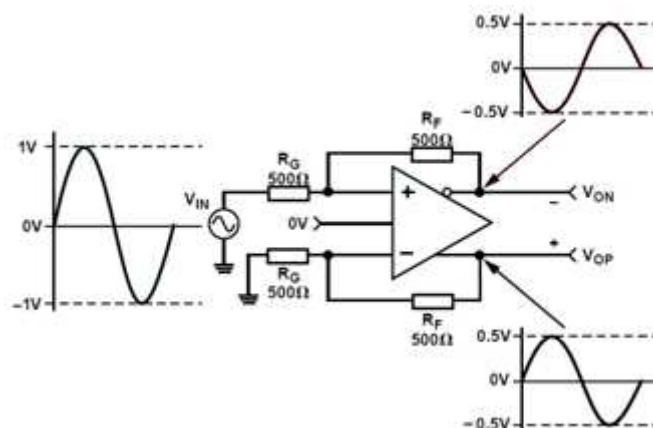
3.4.6 Symetrizační článek v podobě integrované obvodu

Jak už bylo zmíněno dříve, existuje i možnost použití symetrizačních článků přímo v podobě integrovaného obvodu. Základní zapojení takového zařízení zobrazuje Obr. 3.15 (zároveň s vnitřním zapojením řešení od Analog Devices - AD8137).



Obr. 3.15 Základní zapojení symetrizačního článku v integrovaném obvodu

Jak je vidět, jedná se v podstatě o operační zesilovač. Na rozdíl od něj, ale obsahuje dva piny navíc. Jedním z nich je vstup, určující střední hodnotu výstupních signálů (V_{OCM}) a druhý, pro nás velmi důležitý, je invertovaný výstup. Přivede-li se tedy signál na jeden ze vstupů a druhý se uzemní (zároveň s uzemněním pinu V_{OCM}), můžeme na výstupu odebrat z pinu V_{OP} jak původní signál, tak z pinu V_{ON} jeho zápornou invertovanou podobu. Princip lze vidět na Obr. 3.16.



Obr. 3.16 Princip symetrizačního článku v integrovaném obvodu

Velkou výhodou tohoto řešení je ve většině případů naprostá symetrie signálů (z pohledu fáze i amplitudy) a dále samozřejmě použitelnost pro lidi, kteří by se sami neodvážili k výrobě symetrizačních článků, které byly uvedeny výše. Nevýhodou je naopak těžká dostupnost těchto integrovaných obvodů (i když existuje několik řešení od Analog Devices -

například již výše uvedený AD8137, či AD8132 - více o nich lze najít v katalogových listech viz. [16]) a hlavně vyšší pořizovací cena.

3.5 Návrh aktivního symetrizačního článku za použití klasických OZ

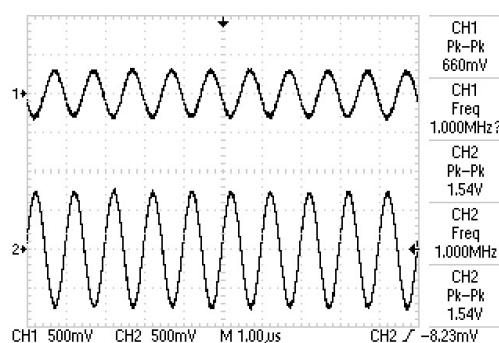
Jak už bylo uvedeno při rozdělení symetrizačních článků, k některým z nich se vrátíme a rozšíříme jejich zapojení do finální podoby. U prvního zapojení, jímž je symetrizační článek se zpětným křížením, se spokojíme s kompletním návrhem součástek. U druhého - symetrizačního článku s jedenkrát otočenou fází - navíc proběhne návrh desky plošných spojů a osazovacího plánu.

Každý ze článku je napájený symetrickým napájením $\pm 15\text{ V}$ z důvodu použití operačních zesilovačů. Tyto operační zesilovače jsou v provedení od firmy Analog Devices, přesněji se jedná o operační zesilovače AD847J. Zapojení tohoto operačního zesilovače lze najít v katalogovém listu [16]. Pro více informací obecně o operačních zesilovačích, jejich zapojení (napětový sledovač, invertující zesilovač, rozdílový zesilovač), jejich napájení a mnoho dalšího se lze dočíst v [17], [18] a [13].

3.5.1 Symetrizační článek se zpětným křížením

Návrh symetrizačního článku se zpětným křížením vychází z podoby zobrazené na Obr. 3.11. Při tomto zapojení není možné si příliš vybírat a počítat hodnoty odporů, jelikož jejich poměry jsou předem dané. Odporů R_1 až R_4 musí mít přesně poloviční hodnotu, než zpětnovazební odpory R_5 až R_8 . V našem případě to byly hodnoty $5\text{ k}\Omega$ a $10\text{ k}\Omega$. Poslední dva odpory R_9 a R_{10} poté slouží k určení výstupní impedance článku.

Zapojení se zpětným křížením mělo být podle původního záměru jedním ze zhotovených výrobků. Při experimentálním ověření se ale zjistilo, že zapojení nefunguje tak, jak bylo předpokládáno. Jak ukazuje Obr. 3.17, jež zobrazuje naměřený průběh z osciloskopu, fázový posun je sice krásně symetrický, amplitudy kladného a záporného napětí se ale velmi liší a toto zapojení tedy nemůže být použito pro výrobu.



Obr. 3.17 Naměřený průběh symetrického článku se zpětným křížením

Jak bylo nakonec zjištěno, je toto zapojení velmi choulostivé na přesné hodnoty odporů a na jejich dvojnásobný poměr a je velmi složité jej vytvořit v obyčejných podmínkách. Navíc velmi záleží na parametrech operačních zesilovačů. I z těchto důvodů je raději doporučováno se tomuto zapojení vyvarovat, a pokud je o něj zájem raději využít již továrně vytvořený symetrizační článek od známých firem jako je Analog Devices, či THAT.

3.5.2 Symetrizační článek s jedenkrát otočenou fází

Při finálním návrhu se vychází ze schématu, zobrazeném na Obr. 3.9. Jak již bylo řečeno dříve, jedná se o pouhé zapojení napěťového sledovače, pro získání kladného signálu HOT, a invertujícího zesilovače pro záporný signál COLD. Při tomto zjednodušeném zapojení se však nebere v potaz impedanční přizpůsobení, či fázový posun signálů a tak je nutné jeho rozšíření.

Prvním důležitým rozšířením je přivedení odporu na vstup článku, na Obr. 3.18 zobrazen jako Z_{IN} . Tento odpor má pevnou hodnotu 50 Ω a slouží k impedančnímu přizpůsobení článku ke vstupnímu generátoru, připojeného na nesymetrický vstup.

Další části navíc jsou odpory R_1 a R_4 s kondenzátory C_1 a C_2 . Tyto korekční členy nám zaručují, že nebude docházet k fázovému posuvu, stejně jako při zapojení symetrizačního článku se zpětným křížením, kde by měl být tento problém řešen různým zapojením zpětné vazby. Jejich návrh vychází z výpočtu pro mezní frekvenci f_m . Jak již bylo řečeno dříve, činitel zpětné vazby β je u obou zapojení různý (při sledovači je roven 1, u invertujícího zapojení naopak roven 0,5) a jejich mezní frekvence jsou tedy různé. Tím pádem ani fázové charakteristiky nemusí být souměrné. Výpočet těchto RC členů ukazuje vzorec (3.16).

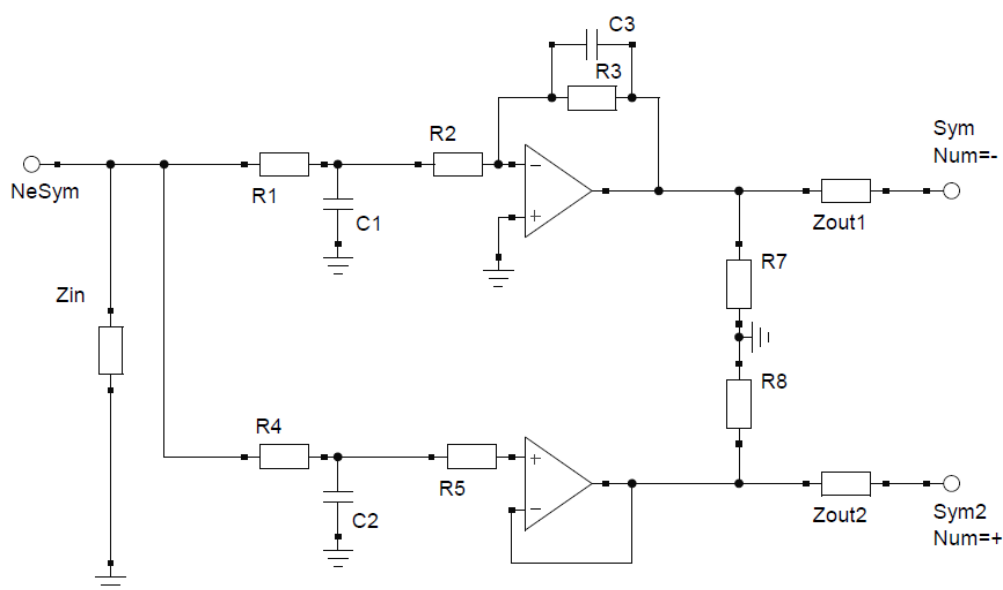
$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \text{ [Hz; } \Omega, \text{ F]} \quad (3.16)$$

Aby byly tyto mezní frekvence rovny u obou zapojení, je potřeba, aby u invertujícího zapojení byla tato hodnota dvakrát vyšší, než při zapojení napěťového sledovače. Proto po dosazení do vzorce (3.16) byly vybrány hodnoty kondenzátorů $C_1 = C_2 = 33\text{pF}$ a hodnoty odporů $R_1 = 120\ \Omega$ a $R_4 = 240\ \Omega$.

Navíc jsou pro lepší stabilitu a potlačení nežádoucích zákmitů na vstup napěťového sledovače a invertujícího zesilovače přivedeny $100\ \Omega$ odpory, vyznačené jako R_5 a R_2 . Stejně tak je přiveden filtrační kondenzátor k zpětnovazebnímu odporu invertujícího zesilovače. Ten taktéž slouží k potlačení nežádoucích jevů.

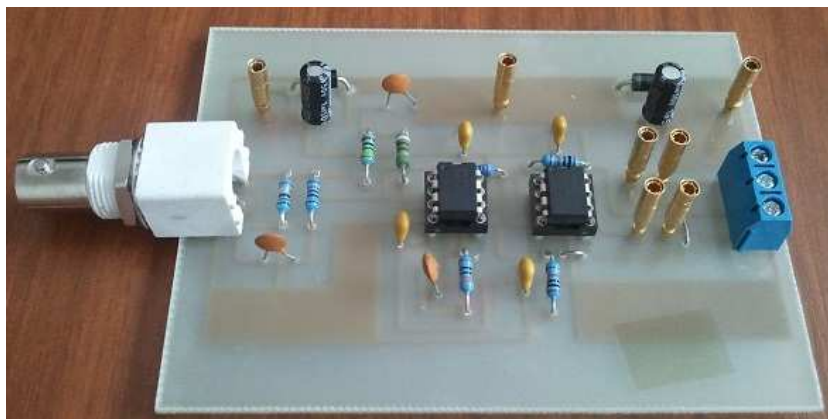
Posledním rozšířením, které sice není pro zapojení nezbytné, přesto však bylo zařazeno, je přidání odporů R_7 a R_8 s rovnající se hodnotou (v našem případě $10\ \text{k}\Omega$). Tyto odpory, zapojené v sérii, jsou ve středu uzemněny, čímž je výstup článku tzv. ukotven k zemi. Díky tomu se symetrie výstupu více blíží k dokonalosti, což je samozřejmě pro náš článek plusem.

Podobu článku bez přivedeného napájení zobrazuje Obr. 3.18. Finální podobu, při které jsou na napájecí vstupy operačních zesilovačů přidány blokovací kondenzátory o hodnotě $100\ \text{nF}$ a navíc obsahující u vstupních napájecích svorek páry v podobě přepětové ochrany (Transil do $\pm 18\ \text{V}$) a většího filtračního kondenzátoru ($1\ \mu\text{F}$), je možno shlédnout v příloze (Příloha D). Navíc je v přílohách (Příloha E a Příloha F) zobrazena deska plošných spojů a osazovací plán.



Obr. 3.18 Rozšířené schéma symetrizačního článku s jedenkrát otáčenou fází
(bez přivedeného napětí)

Na Obr. 3.19 je možné vidět zhotovenou finální podobu symetrizačního článku.



Obr. 3.19 Finální podoba zhotoveného symetrizačního článku (NESYM-SYM)

3.5.3 Článek pro převod symetrického signálu na nesymetrický

Jelikož je našim úkolem i návrh článku, který bude převádět symetrický signál na jeho původní nesymetrickou verzi, je potřeba se zabývat i jím. Tento článek se vyskytuje v jediném zapojení, jehož podobu jsme si zobrazili již dříve na Obr. 3.8. Jedná se o jednoduché zapojení rozdílového zesilovače, který bere symetrické signály HOT a COLD, sečte je (i když se jedná o rozdílový zesilovač, z principu symetrického signálu je jisté, že se signály sečtou) a díky tomu je možné na výstupu odebírat původní podobu nesymetrického signálu. Hodnoty odporů rozdílového zesilovače si musí být rovny, aby došlo k přesnému sečtení obou signálů. Opět je potřeba toto jednoduché zapojení rozšířit o několik součástek, aby článek fungoval podle našich představ.

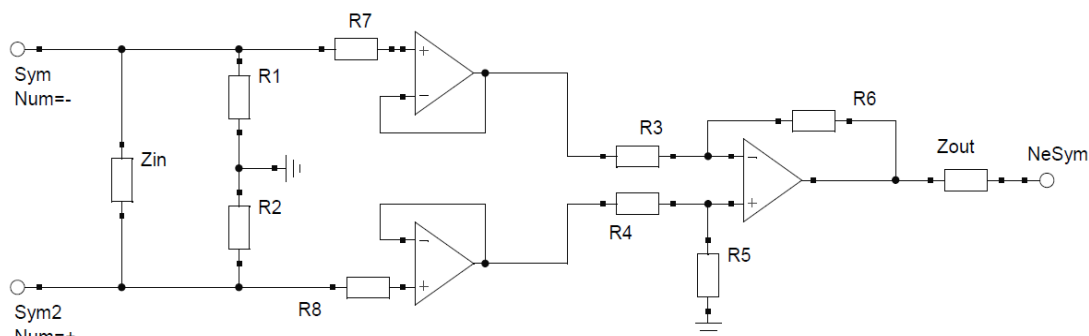
Prvním rozšířením je vstupní impedance článku, jenž se připojuje ke vstupu symetrického signálu. Hodnota impedance se nastavuje výměnou odporu Z_{IN} dle potřeby.

I v tomto zapojení jsou zahrnuty sériově zapojené odpory R_1 a R_2 s rovnající se hodnotou ($10\text{ k}\Omega$), ve svém středu připojené na zem. Stejně jako v minulém případě slouží k ukotvení (tentokrát) vstupu k zemi.

Nejvíce viditelnou změnou je zařazení dvou napětových sledovačů (pro kladný i záporný signál) se stabilizačními odpory R_7 a R_8 , jenž nám opět slouží k potlačení nežádoucích záskmitů (hodnoty odporů jsou rovny $100\text{ }\Omega$). Tyto sledovače nám díky svému vysokému (teoreticky nekonečnému) vstupnímu odporu oddělují předcházející obvod od následujícího.

Posledním rozšířením je výstupní impedance Z_{OUT} , jenž nám přizpůsobuje výstup článku.

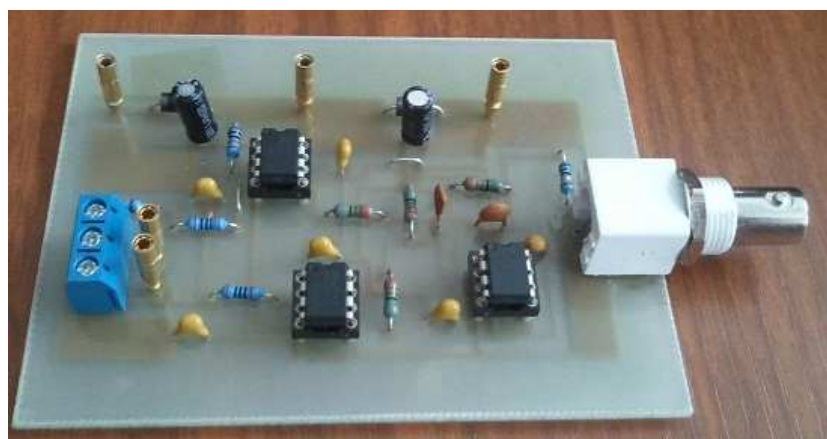
Rozšířené schéma je možno vidět na Obr. 3.20.



Obr. 3.20 Rozšířené schéma článku pro převod ze symetrického na nesymetrický signál

Ve finální podobě byly opět navíc přidány ochrany proti přepětí v podobě transilů, stejně jako filtračních kondenzátorů. Toto finální schéma se nalézá v přílohách (Příloha I), stejně jako deska plošných spojů a osazovací plán (Příloha J, Příloha K).

Na Obr. 3.21 je možné vidět zhotovenou finální podobu symetrizačního článku.



Obr. 3.21 Finální podoba zhotoveného symetrizačního článku (NESYM-SYM)

Velkou výhodou tohoto zapojení je použitelnost se všemi symetrizačními články s operačními zesilovači, které byly v této práci uvedeny.

3.6 Návrh aktivního symetrizačního článku za použití CC-II⁺

Při návrhu symetrizačního článku za použití kladných proudových konvejořů 2. generace (CC-II⁺) se vychází ze schémat zobrazených na Obr. 3.13 a Obr. 3.14.

Symetrizační článek, jenž převádí nesymetrický signál na symetrický (Obr. 3.13), má na svém vstupu odpor pro impedanční přizpůsobení R_i s připojeným generátorem. Odpor má hodnotu rovnou $50\ \Omega$ a je přiveden na zem. Jelikož je úkolem článku převod signálu ve stejném poměru tak, aby nedocházelo k žádnému zesílení, je potřeba, aby si odpory R_X a R_Z byly naprosto rovny. Aby zapojením neprocházel příliš vysoký proud, je zvolena hodnota $R_X = R_Z = 10\ \text{k}\Omega$. Výstupní impedance je měnitelná podle potřeby.

Článek, který převádí symetrický signál zpět na nesymetrický (Obr. 3.14), má podobné hodnoty. Na vstupu je tedy měnitelná hodnota vstupní impedance. Dále je opět potřeba zvolit hodnoty odporů R_X a R_Z . Stejně jako v předchozím případě si musí být naprosto rovny, aby nedocházelo k žádnému zesílení a i zde je jejich hodnota rovna $10\ \text{k}\Omega$. Na výstupu zbývá pouze odpor R_{OUT} pro impedanční přizpůsobení k připojenému osciloskopu.

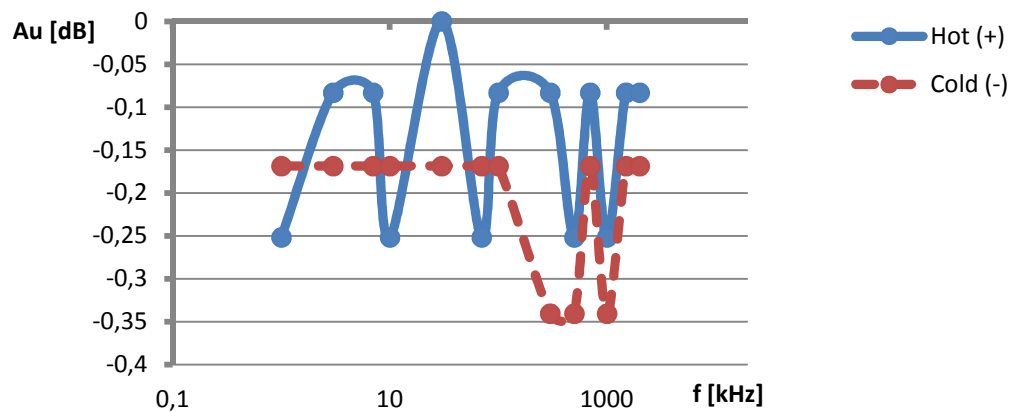
Finální podoba by samozřejmě obsahovala navíc přivedené napájení a kondenzátory pro potlačení nežádoucích zákmitů, či transily jako přepěťovou ochranu. Jelikož ale nebylo možné kvůli nedostatku proudových konvejořů toto zapojení zhotovit, stačí návrh základní.

3.7 Měření finálního symetrizačního článku

Při měření symetrizačního článku se vycházelo ze zhotovených výrobků, díky čemuž byla i odzkoušena jejich funkčnost. U obou byly naměřeny hodnoty amplitud s rostoucí frekvencí a ty byly potom zaneseny do frekvenčních charakteristik.

3.7.1 Měření symetrizačního článku s jedenkrát otáčenou fází

Prvně se zapojil pouze symetrizační článek s jedenkrát otáčenou fází, čili článek, který převádí nesymetrický signál na symetrický. Na první kanál osciloskopu byl přiveden signál kladný, na druhý signál záporný. Výsledná frekvenční charakteristika je zobrazena na Obr. 3.22.

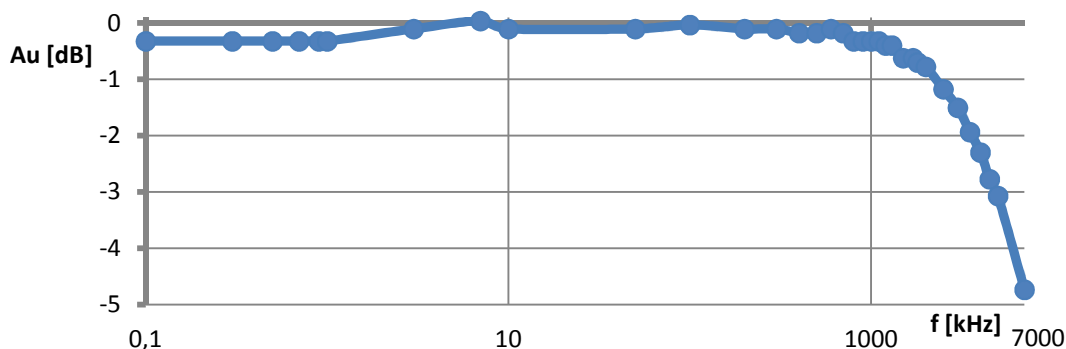


Obr. 3.22 Frekvenční charakteristika symetrizačního článku (NESYM/SYM)

Na x-ovou osu byla nanesena frekvence od 1 kHz do požadovaných 2 MHz a na y-ovou napěťový přenos, ukazující pokles výstupního napětí oproti vstupnímu v dB. Jak lze vidět, maximální útlum u kladného napětí dosáhl hodnoty -0,25 dB a u záporného -0,35 dB, což jsou hodnoty v podstatě zanedbatelné. Největší rozdíl mezi kladným a záporným signálem poté dosáhl na 0,25 dB, takže opět na hodnotu, která nemá žádný vliv na funkčnost článku. Vybrané průběhy z osciloskopu, na kterých lze i vidět, že fázový posun je taktéž symetrický, je možné najít v přílohách (přesněji Příloha H).

3.7.2 Měření článku pro převod symetrického signálu na nesymetrický

Druhý článek se při měření zapojil za předchozí a jeho výstup se připojil na druhý kanál osciloskopu. Na první kanál byl přiveden signál z generátoru, díky čemuž bylo možno porovnávat vstupní signál a signál převedený zpátky na původní - nesymetrický. Frekvenční charakteristiku zobrazuje Obr. 3.23.



Obr. 3.23 Frekvenční charakteristika symetrizačního článku (SYM/NESYM)

Opět byl na y-ovou osu nanesen napěťový přenos v dB a na x-ovou rozsah frekvencí (tentokrát od 100 Hz do 7 MHz). Signál až do hodnoty 1 MHz dosahoval velmi nízkých hodnot útlumu (maximálně -0,3 dB) a při požadovaných 2 MHz byl útlum -0,7 dB, což je stále ještě přijatelná úroveň. S rostoucí frekvencí ale začíná úroveň signálu prudce klesat, 3dB útlumu je dosaženo při frekvenci 5 MHz. Tato hodnota je tedy pro článek mezní - f_{\max} . Při 7 MHz je již dosaženo příliš vysokého útlumu (téměř 5 dB) a při této frekvenci již nepracuje článek správně (navíc je fázový posun mezi signály již příliš vysoký - signály jsou dokonce v protifázi). Výsledné průběhy z osciloskopu je opět možno najít v přílohách (Příloha M).

3.8 Porovnání pasivního a aktivního symetrizačního článku

3.8.1 Teoretické porovnání

Aktivní symetrizační článek by měl mít oproti pasivnímu mnoho výhod. Mezi ně patří například jednodušší výroba, z čehož vyplývá i nižší cena. Dále to jsou menší rozměry a především daleko větší šířka přenášeného pásma.

Oproti tomu má pasivní článek samozřejmě i své výhody. Jednou z nich je například nulová potřeba elektrické energie i při vysokofrekvenčních signálech.

V dnešní době se lze s pasivními symetrizačními články setkat především ve vysokofrekvenčních zapojeních, jako jsou například televizní antény apod., kdežto s aktivními je čím dál častější možnost setkání v zapojeních pro různá audio řešení, či v telekomunikační technice pracující například v rámci hovorového pásma.

3.8.2 Praktické porovnání

Porovnání v praxi samozřejmě potvrdilo předchozí domněnky. Šířka přenášeného pásma u našeho pasivního článku dosáhla hodnoty přibližně 40 kHz. U aktivního článku je tato hodnota téměř 5 MHz. Rozdíl v přenášeném pásmu je tedy obrovský a z tohoto pohledu je daleko lepším řešením právě článek aktivní. Stejně z pohledu proveditelnosti výroby dostává většinu kladných bodů právě článek aktivní.

Na druhou stranu nepotřeba zdroje napájení u pasivního článku mu stále zaručuje mnoho míst k využití (například u antén se téměř vždy lze setkat s pasivním provedením symetrizačního článku).

4 Závěr

První část bakalářské práce se zabývala články útlumovými. Prvním důležitým rozhodnutím, které muselo z počátku být učiněno, byl výběr výsledné podoby článku. Z původní představy výroby kaskádově řazeného útlumového článku sešlo a byly vybrány čtyři hlavní hodnoty útlumu - 3, 6, 10 a 20 dB. Poté bylo pro návrh vybráno zapojení v podobě π -článku pro jeho univerzálnost a pro jednodušší ladění výsledného útlumu, nežli u článku ve tvaru písmene T. Následně proběhli výpočty a experimentální ověření správnosti vypočítaných hodnot na nepájivém poli. Jelikož se výsledné útlumy při ověření lišily, bylo rozhodnuto o přidání dalšího odporu do zapojení, díky kterému hodnota útlumu získala přesnější podobu. Následná výroba plošného spoje již proběhla v pořádku a posledním krokem bylo využití plastových krabiček o rozměrech 7x5 cm, do kterých se tyto plošné spoje vložily. Nakonec zbylo jen přeměření útlumů výsledných výrobků, kdy byl u 3 dB článku zjištěn útlum o přibližně 5% nižší. V rámci tolerance se však jedná o přípustný rozdíl. Zbylé útlumové články již dosahovaly přesných hodnot požadovaného útlumu. Z tohoto pohledu byl tedy první bod zadání bakalářské práce splněn.

Druhá část práce pojednávala o symetrizačních člancích. V první půlce, zabývající se symetrizačními články pasivními, byla především popsána výroba symetrizačního transformátoru, jenž měl za úkol pracovat v hovorovém frekvenčním pásmu se vstupní a výstupní impedancí rovnou 600 Ω . Zde byl vypočítán transformátor složený ze 42 závitů o průměru 0,4 mm, a jenž má jádro tvořené plechy M5. Jeho proveditelnost v normálních podmínkách nebyla odzkoušena, jelikož byl vybrán pro měření již zhotovený symetrizační transformátor od firmy Tronic Praha. Na něm byla zjištěna šířka přenášeného pásma o velikosti téměř 40 kHz, kdy článek pracoval spolehlivě i nad hovorovým pásmem. Druhá půlka se poté zabývala aktivními symetrizačními články. Původní myšlenkou byla výroba několika zapojení, kdy jedním měl být i článek složený z proudových konvektorů. Z důvodu jejich nedostatku se od této myšlenky odstoupilo, stejně jako od zapojení s operačními zesilovači, které bakalářská práce popisuje jako symetrizační článek se zpětným křížením. U tohoto zapojení proběhlo pouze experimentální přeměření. Pro výrobu bylo nakonec vybráno zapojení s jedenkrát otáčenou fází, kdy jsou pro doladění fázového posuvu použity korekční RC členy. Zde opět probíhalo prvně experimentální ověření na nepájivém poli a až následně výroba plošného spoje. Při měření byla zjištěna funkčnost až do požadované frekvence 2 MHz a článek tedy pracoval správně. Pro následný převod zpět na nesymetrický signál bylo použito zapojení s rozdílovým zesilovačem, kdy i zde proběhlo ověření na nepájivém poli a následně výroba.

Při propojení obou článků byla zjištěna šířka přenášeného pásma téměř 5 MHz. Tím byl tedy splněn i druhý bod práce.

Z pohledu rozšíření článků není mnoho na výběr. U útlumových je jejich podoba přesně daná a jedinou změnou by bylo využití kaskádového řazení například dvaceti 1dB článků, kdy by si sám uživatel vybral potřebný útlum. Vezme-li se však v potaz, že většina hodnot útlumů se v praxi příliš nepoužívá, bylo by toto zapojení zbytečně velké a nepraktické. U pasivního symetrizačního článku je zajisté lepší výběr již vytvořeného transformátoru se specifickými parametry, kterých se na trhu objevuje obrovské množství. U aktivního článku by se našlo rozšíření určitě více, od zvýšení frekvenčního rozsahu, použití přesnějších součástek, či rychlejších operačních zesilovačů, až po zhotovení zapojení s proudovými konvejory.

Použitá literatura

- [1] EICHLER, Josef. *Elektronická měření*. 1. vydání. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1977, 488 s.
- [2] JURKOVIČ, Kamil; ZODL, Ján. *Průručka nízkofrekvenční obvodové techniky*. 2. vydání. Bratislava : Alfa, 1985, 688 s.
- [3] Attenuators. *WWW.ELECTRONICS-TUTORIALS.COM* [online]. 09.01.2011 [cit. 2012-02-27]. Dostupné z:
<http://www.electronics-tutorials.com/basics/attenuators.htm>
- [4] Jak vám to brumí? Symetrické a nesymetrické zapojení ve zvukařské praxi. STANĚK, Radomír. *Muzikus.cz* [online]. 22.11.2004 [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Jak-vam-to-brumi-Symetricke-a-nesymetricke-zapojeni-ve-zvukarske-praxi~22~listopad~2004/>
- [5] What is Balanced & Unbalanced?. *IEC* [online]. © 1996-2010 [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://www.iec-usa.com/Browse05/DTBALUN.html>
- [6] Line balance. In: *Yarchive* [online]. [1998] [cit. 2012-02-11]. Dostupné z: <http://yarchive.net/phone/balance.html>
- [7] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1999, 393 s. ISBN 80-860-5649-X.
- [8] ŘÍČNÝ, Václav. *Televizní distribuční sítě a systémy: přednášky a numerická cvičení*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2005. 82 s. ISBN 80-214-2816-3.
- [9] SLEZÁK, Luboš. *Výstupní transformátory*. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [10] Interconnection of Balanced and Unbalanced Equipment. WHITLOCK, Bill. JENSEN TRANSFORMERS. *Contractor's AV* [online]. 30.6.1995 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z:
<http://www.contractorsav.com/article/2006/11/19/equipment>
- [11] THOMAS, Hay. Differential Technology in Recording Consoles and the Impact of Transformerless Circuitry on Grounding Technique. *J. Audio Eng. Soc.* 1980, č. 28, s. 1.
- [12] PONTIS, George D. Floating a Source Output. *Hewlett-Packard Journal*. 1980, č. 8, s. 1. Dostupné z: <http://www.hpl.hp.com/hpjournal/pdfs/IssuePDFs/1980-08.pdf>
- [13] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače v elektronice*. 5. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 495 s. ISBN 80-730-0059-8.

- [14] MIŠUREC, Jiří. *Aplikace proudových a napěťových konvejiů: The application of current and voltage conveyors : zkrácená verze habilitační práce*. Brno: VUTUM, 2007, 37 s. ISBN 978-80-214-3404-2 (BROŽ.).
- [15] PUNČOCHÁŘ, Josef. *Operační zesilovače: historie a současnost*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 66 s. ISBN 80-730-0047-4.
- [16] Katalogové listy. *Analog Devices* [online]. [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://www.analog.com/>
- [17] DOSTÁL, Jiří. *Operační zesilovače*. 1. vydání. Praha: BEN, 2005, 504 s. ISBN 80-730-0049-0.
- [18] BELZA, Jaroslav. *Operační zesilovače pro obyčejné smrtelníky*. 1. vydání. Praha: BEN, 2004, 248 s. ISBN 80-7300-060-1.

Seznam obrázků

<i>Obr. 2.1 T-článek</i>	4
<i>Obr. 2.2 π-článek</i>	4
<i>Obr. 2.3 Γ-článek</i>	4
<i>Obr. 2.4 Symetrický T-článek</i>	5
<i>Obr. 2.5 Symetrický π-článek</i>	5
<i>Obr. 2.6 Nastavitelný Γ-článek</i>	5
<i>Obr. 2.7 Kaskádově řazený útlumový článek</i>	8
<i>Obr. 2.8 Výsledné obvody zapojení útlumových článků</i>	11
<i>Obr. 2.9 Výsledná podoba útlumového článku</i>	11
<i>Obr. 2.10 Nasimulovaná hodnota -3 dB útlumového článku</i>	12
<i>Obr. 2.11 Nasimulovaná hodnota -6 dB útlumového článku</i>	12
<i>Obr. 2.12 Nasimulovaná hodnota -10 dB útlumového článku</i>	13
<i>Obr. 2.13 Nasimulovaná hodnota -20 dB útlumového článku</i>	13
<i>Obr. 3.1 Obecné schéma symetrického vedení</i>	15
<i>Obr. 3.2 Princip symetrického vedení</i>	15
<i>Obr. 3.3 Symetrizační transformátor</i>	17
<i>Obr. 3.4 Různá provedení symetrizačních článků pomocí vedení</i>	18
<i>Obr. 3.5 Symetrizační článek typu L-C</i>	18
<i>Obr. 3.6 Zapojení symetrického transformátoru při měření</i>	24
<i>Obr. 3.7 Frekvenční charakteristika symetrického transformátoru</i>	24
<i>Obr. 3.8 Symetrizační článek s dvakrát otáčenou fází</i>	25
<i>Obr. 3.9 Symetrizační článek s jedenkrát otáčenou fází</i>	26
<i>Obr. 3.10 Symetrický výstup vytvořený z existujícího nesymetrického</i>	27
<i>Obr. 3.11 Symetrizační článek se zpětným křížením</i>	27
<i>Obr. 3.12 Originální schéma symetrizačního článku se zpětným křížením</i>	28
<i>Obr. 3.13 Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory (NESYM-SYM)</i>	28
<i>Obr. 3.14 Symetrizační článek tvořen proudovými konvejory (SYM-NESYM)</i>	29
<i>Obr. 3.15 Základní zapojení symetrizačního článku v integrovaném obvodu</i>	30
<i>Obr. 3.16 Princip symetrizačního článku v integrovaném obvodu</i>	30
<i>Obr. 3.17 Naměřený průběh symetrického článku se zpětným křížením</i>	32
<i>Obr. 3.18 Rozšířené schéma symetrizačního článku s jedenkrát otáčenou fází</i>	33
<i>Obr. 3.19 Finální podoba zhotoveného symetrizačního článku (NESYM-SYM)</i>	34
<i>Obr. 3.20 Rozšířené schéma článku pro převod ze symetrického na nesymetrický signál</i>	35
<i>Obr. 3.21 Finální podoba zhotoveného symetrizačního článku (NESYM-SYM)</i>	35

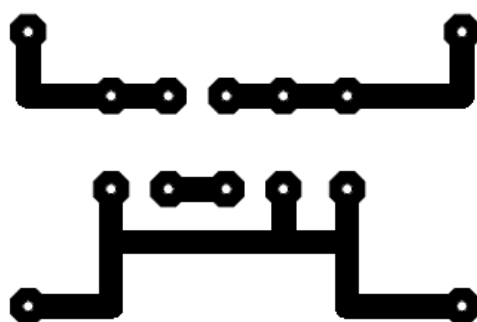
<i>Obr. 3.22 Frekvenční charakteristika symetrizačního článku (NESYM/SYM)</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 3.23 Frekvenční charakteristika symetrizačního článku (SYM/NESYM)</i>	<i>38</i>

Seznam tabulek

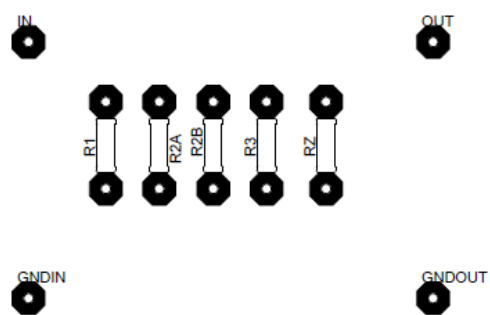
<i>Tabulka 2.1 Tabulka přepočítaných hodnot z dB na útlum.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabulka 2.2 Hodnoty odporů při impedanci 600 Ω.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabulka 2.3 Hodnoty odporů T-článku při impedanci 50 Ω.....</i>	<i>9</i>
<i>Tabulka 2.4 Tabulka reálných hodnot v řádu E24.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabulka 2.5 Tabulka výsledných použitých hodnot.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabulka 2.6 Porovnání dosažených a teoretických výsledků.....</i>	<i>14</i>

Seznam příloh

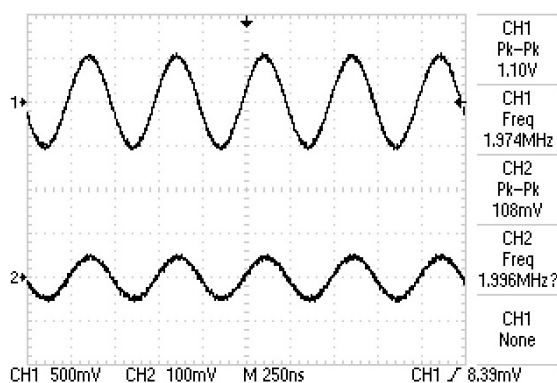
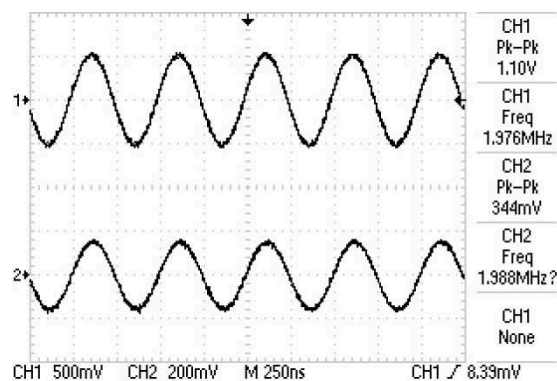
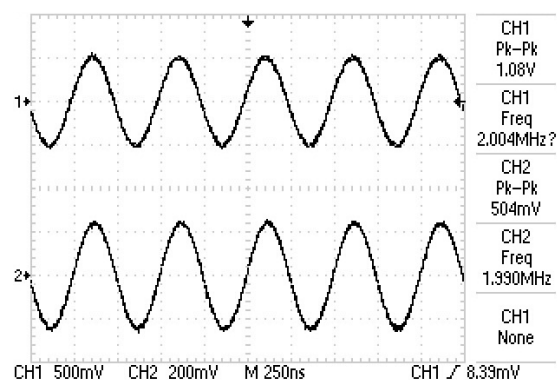
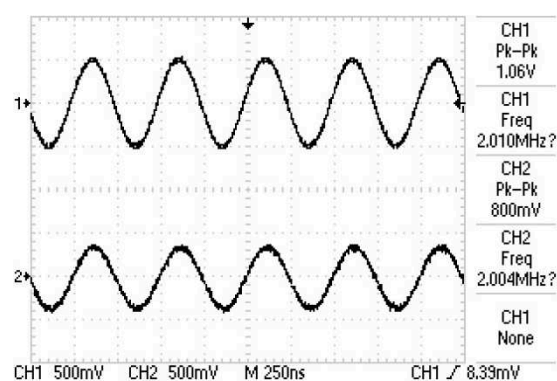
<i>Příloha A Deska plošných spojů pro útlumový článek.....</i>	<i>ii</i>
<i>Příloha B Osazovací plán pro útlumový článek.....</i>	<i>iii</i>
<i>Příloha C Výsledné průběhy útlumových článků (postupně 3, 6, 10 a 20 dB).....</i>	<i>iv</i>
<i>Příloha D Kompletní schéma symetrizačního článku (NESYM-SYM).....</i>	<i>v</i>
<i>Příloha E Deska plošných spojů symetrizačního článku (NESYM-SYM)</i>	<i>vi</i>
<i>Příloha F Osazovací plán symetrizačního článku (NESYM-SYM)</i>	<i>vii</i>
<i>Příloha G Seznam použitých součástek pro symetrizační článek (NESYM-SYM)</i>	<i>viii</i>
<i>Příloha H Výsledné průběhy symetrizačního článku (NESYM-SYM).....</i>	<i>ix</i>
<i>Příloha I Kompletní schéma symetrizačního článku (SYM-NESYM).....</i>	<i>x</i>
<i>Příloha J Deska plošných spojů symetrizačního článku (SYM-NESYM).....</i>	<i>xi</i>
<i>Příloha K Osazovací plán symetrizačního článku (SYM-NESYM).....</i>	<i>xii</i>
<i>Příloha L Seznam použitých součástek pro symetrizační článek (SYM-NESYM).....</i>	<i>xiii</i>
<i>Příloha M Výsledné průběhy symetrizačního článku (NESYM-NESYM).....</i>	<i>xiv</i>



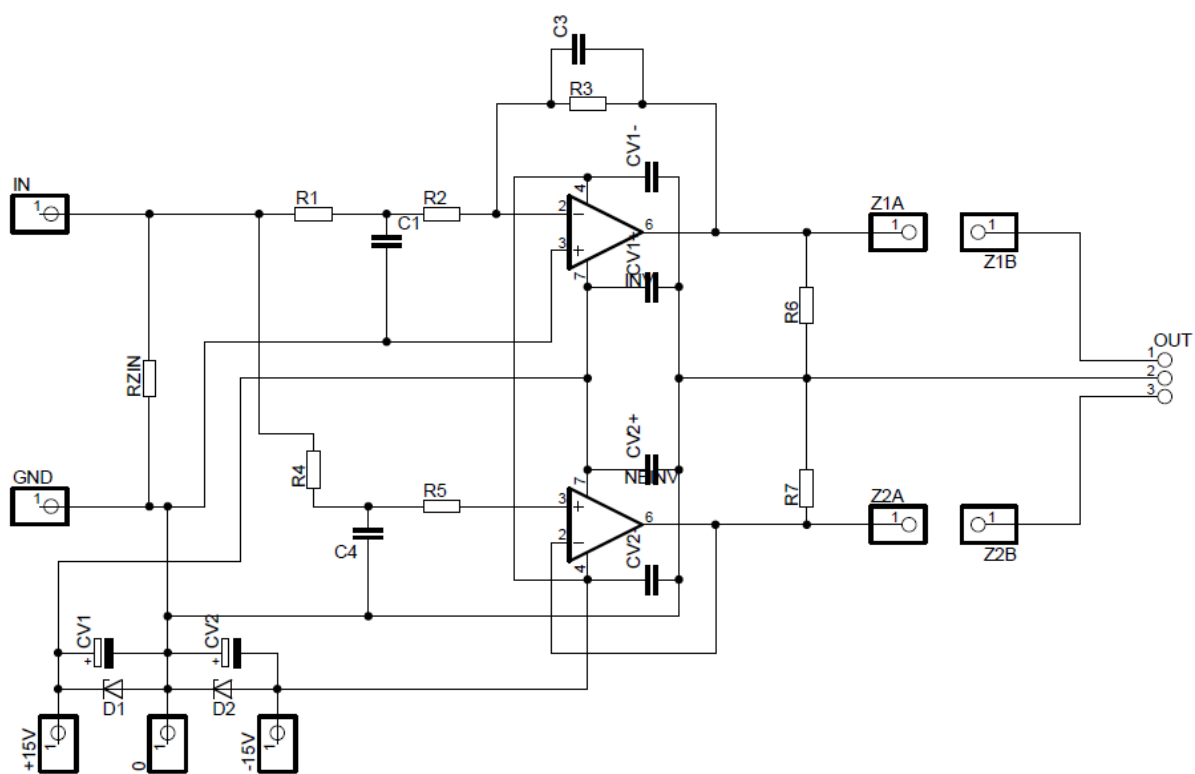
*Příloha A Deska plošných spojů
pro útlumový článek*



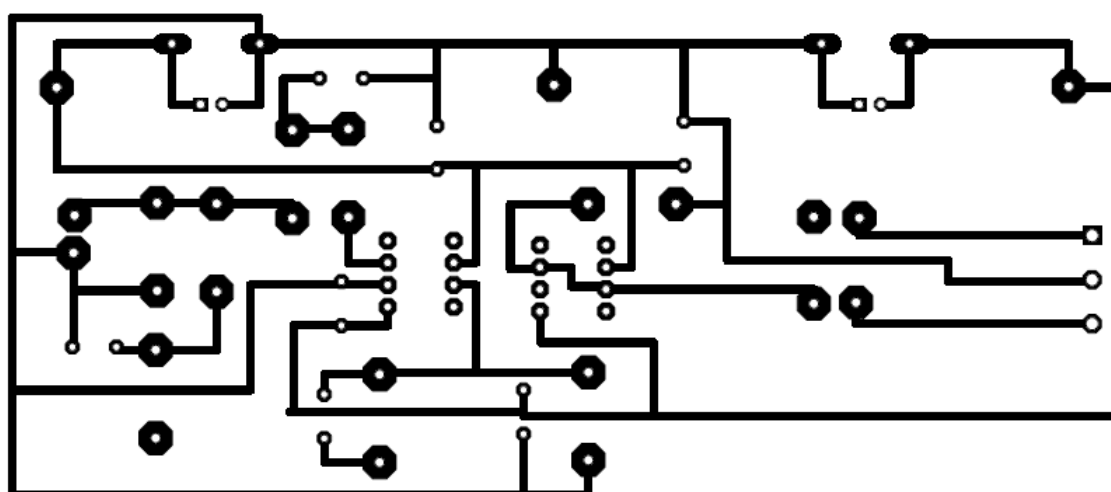
*Příloha B Osazovací plán pro útlumový
článek*



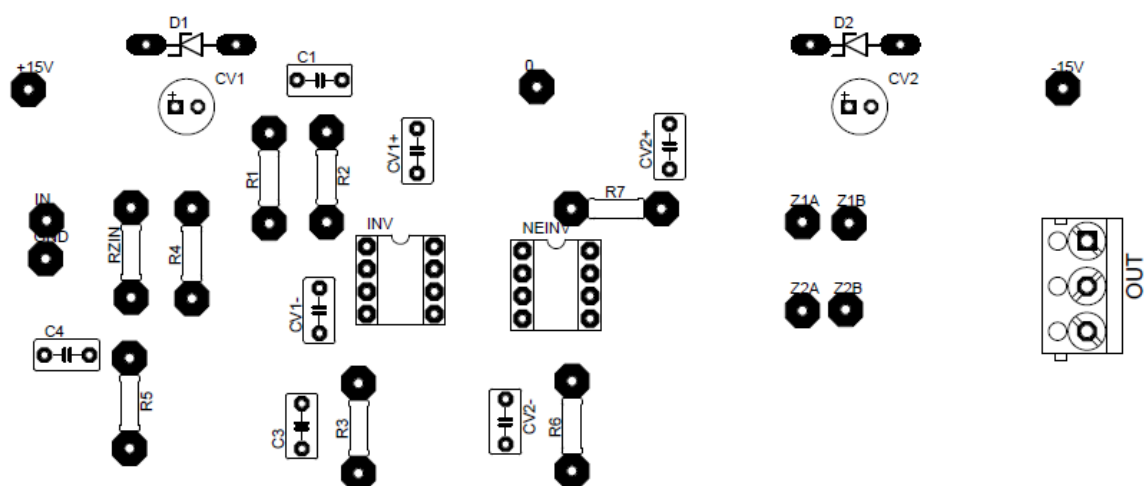
*Příloha C Výsledné průběhy útlumových článků
(postupně 3, 6, 10 a 20 dB)*



Příloha D Kompletní schéma symetrizačního článku (NESYM-SYM)



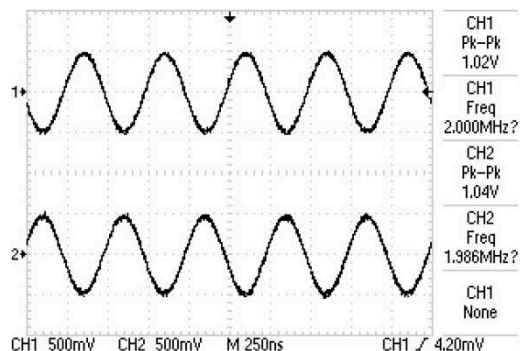
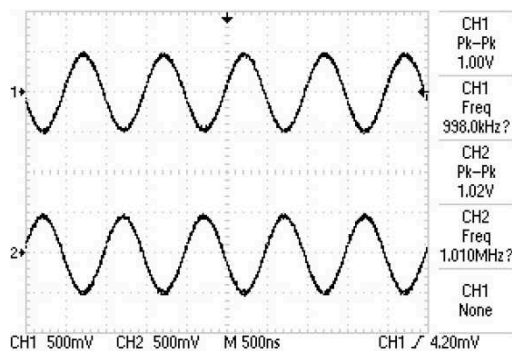
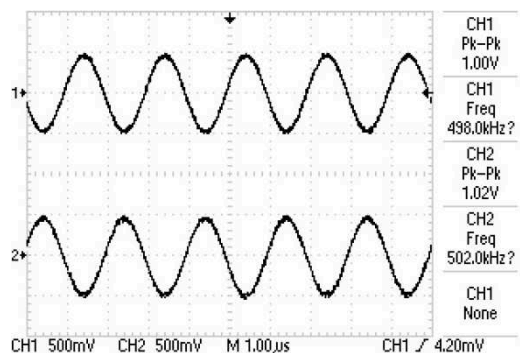
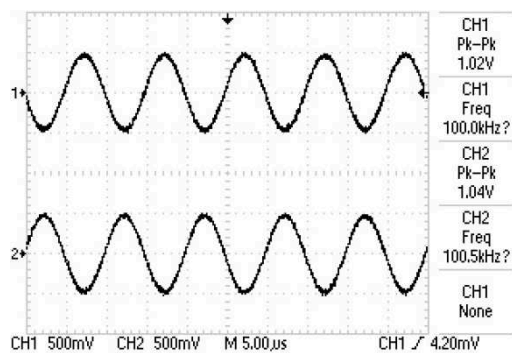
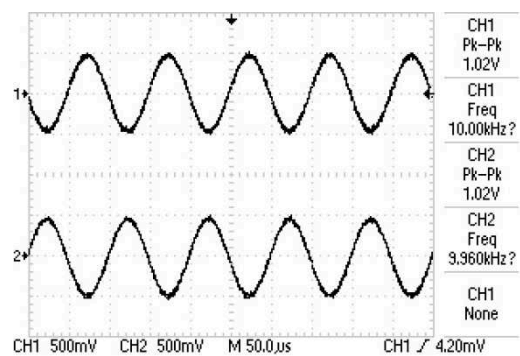
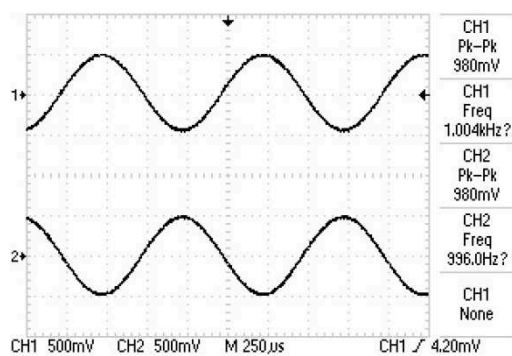
Příloha E Deska plošných spojů symetrizačního článku (NESYM-SYM)



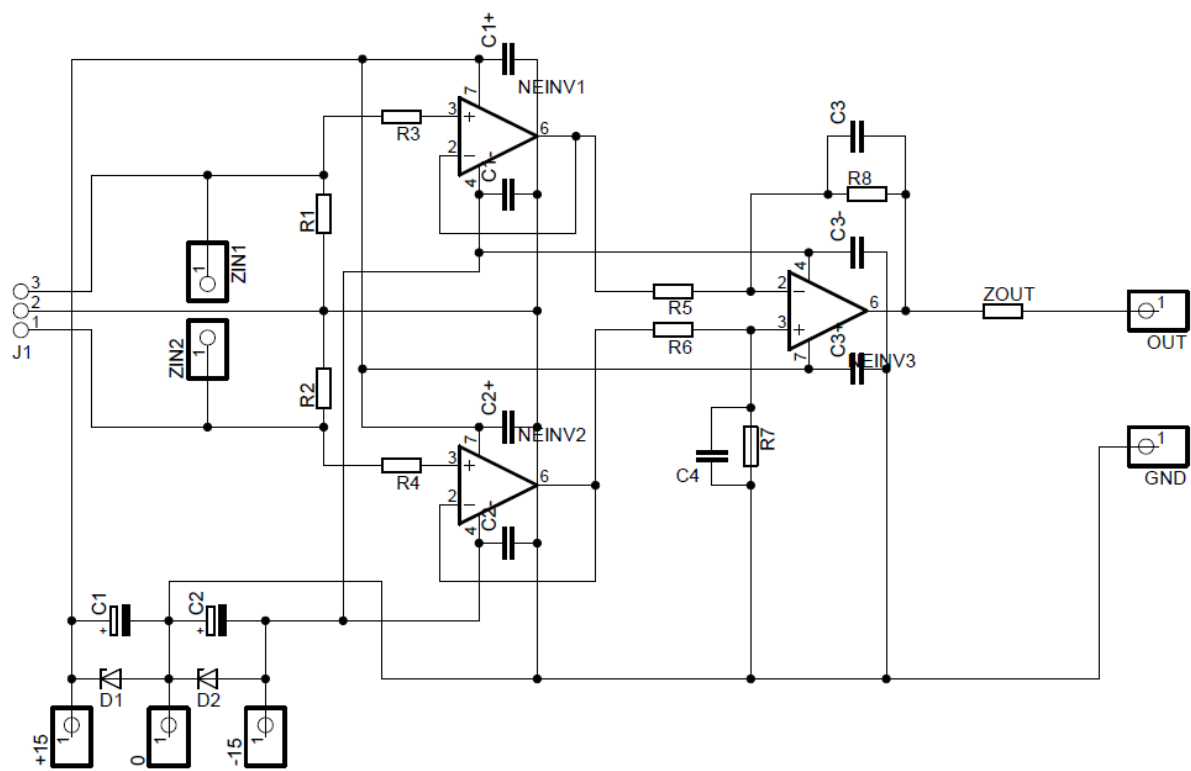
Příloha F Osazovací plán symetrizačního článku (NESYM-SYM)

Součástka	Hodnota		Součástka	Hodnota
D1	Transil ± 18 V		R1	120 Ω
D2	Transil ± 18 V		R2	100 Ω
CV1	1 μ F		R3	220 Ω
CV2	1 μ F		R4	240 Ω
CV1+	100 nF		R5	100 Ω
CV2+	100 nF		R6	10 k Ω
CV1-	100 nF		R7	10 k Ω
CV2-	100 nF		C1	33 pF
RZIN	56 Ω		C3	4,7 pF
OUT	ARK 500/3		C4	33 pF

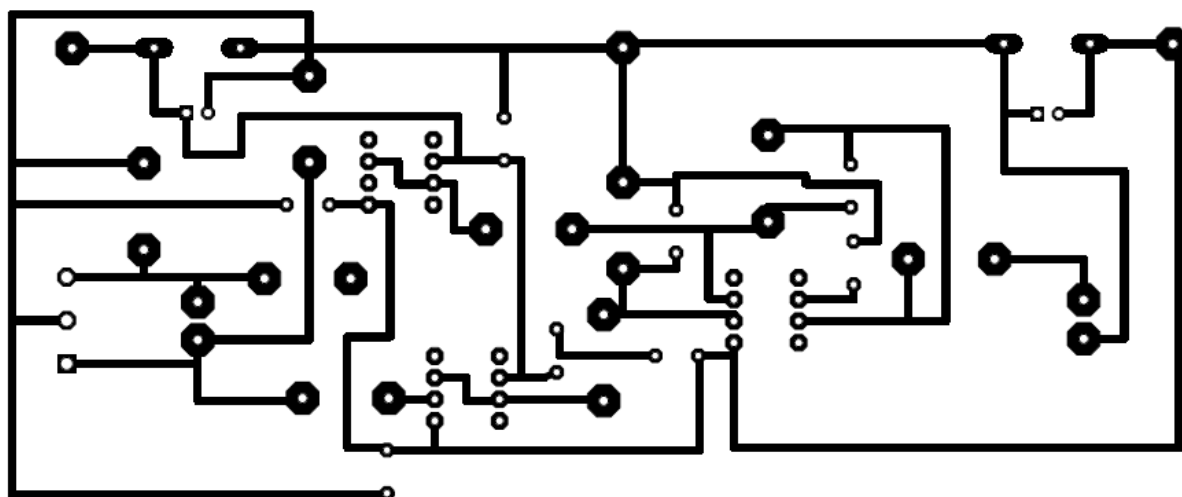
Příloha G Seznam použitých součástek pro symetrizační články (NESYM-SYM)



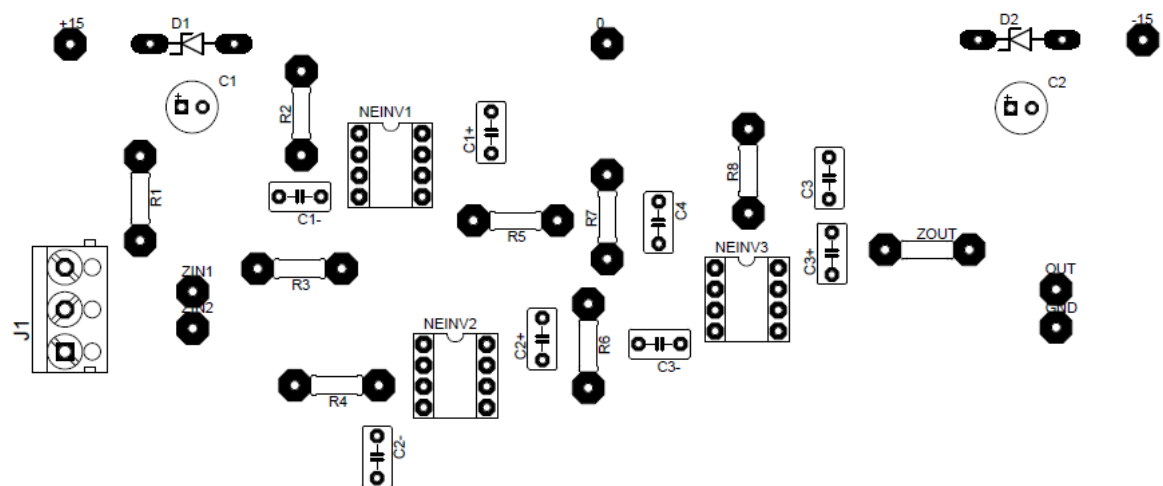
Příloha H Výsledné průběhy symetrizačního článku (NESYM-SYM)



Příloha I Kompletní schéma symetrizačního článku (SYM-NESYM)



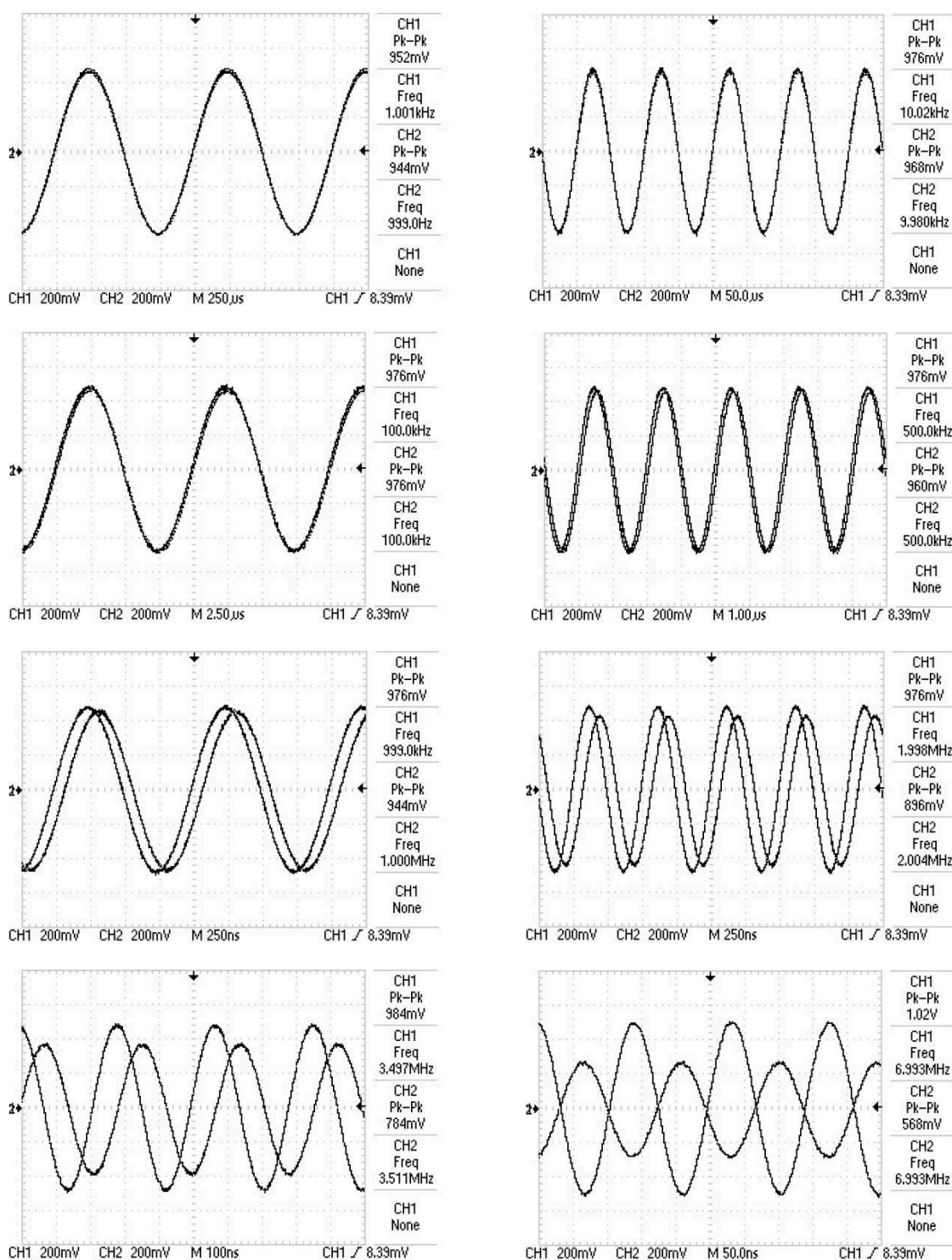
Příloha J Deska plošných spojů symetrizačního článku (SYM-NESYM)



Příloha K Osazovací plán symetrizačního článku (SYM-NESYM)

Součástka	Hodnota		Součástka	Hodnota
D1	Transil ± 18 V		R1	10 k Ω
D2	Transil ± 18 V		R2	10 k Ω
C1	1 μ F		R3	100 Ω
C2	1 μ F		R4	100 Ω
C1+	100 nF		R5	7,5 k Ω
C2+	100 nF		R6	7,5 k Ω
C1-	100 nF		R7	7,5 k Ω
C2-	100 nF		R8	7,5 k Ω
ZOUT	56 Ω		C3	4,7 pF
J1	ARK 500/3		C4	4,7 pF

Příloha L Seznam použitých součástek pro symetrizační článek (SYM-NESYM)



Příloha M Výsledné průběhy symetrizačního článku (NESYM-NESYM)